

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**OPTIMIZACIÓN DE LA REACCIÓN DE HIDRÓLISIS ÁCIDA DE LOS  
RESIDUOS DE LA PLANTA DE BANANO, PARA MAYOR RENDIMIENTO A  
GLUCOSA**

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera Química

**AUTORA:**

**MÓNICA FERNANDA ABRIL GONZÁLEZ**

**C.I.: 0106529688**

**DIRECTORA:**

**ING. TERESA SILVANA ZALAMEA PIEDRA MSC**

**C.I.: 0101325801**

**CUENCA – ECUADOR**

**2016**



## RESUMEN

El agotamiento de las materias primas no renovables, así como la creciente conciencia ambiental, ha generado la necesidad en los países de aumentar su matriz energética, impulsando la investigación hacia la producción de biocombustibles de segunda generación, que permiten el aprovechamiento del material lignocelulósico residual, siendo este el propósito del Proyecto Producción de Hidrogeno a Partir de la Biomasa Procedente de los Residuos de la Planta de Banano mediante Gasificación Catalítica en Agua a Temperatura Supercrítica, dentro del cual se enmarca el presente trabajo.

Se estudia una etapa esencial para la transformación en combustibles, como es la conversión del material lignocelulósico en azúcares solubles, a partir de los residuos de la planta de banano de la variedad Gran Cavendish, que se generan en Ecuador.

La reacción de hidrólisis que nos conducirá a alcanzar el objetivo planteado se efectuó con cada una de las partes de la planta de banano, utilizando diluciones de ácido sulfúrico en concentraciones de 3, 6 y 10% v/v, con tiempos de reacción de 15, 30 y 60 min, y temperaturas de 60 y 93°C.

Los resultados obtenidos de esta reacción, se analizaron mediante la lectura de grados Brix, Análisis Dissolved Organic Carbon (DOC) para determinar la cantidad de carbono disuelto y mediante High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) para identificar y cuantificar los azúcares presentes.

La mayor cantidad de glucosa se encontró en el pseudotallo, cuando en el proceso de hidrólisis se utilizó ácido sulfúrico diluido variando su concentración, la temperatura y tiempo de la reacción.

**PALABRAS CLAVE:** biomasa, banano, hidrólisis, optimización, rendimiento, glucosa.



## ABSTRACT

The depletion of the not renewable raw materials, as well as the increasing environmental conscience, has generated the need in the countries to increase his energetic counterfoil, stimulating the investigation towards the production of biocommbustibles of the second generation, that they allow the utilization of the lignocellulosic residual material, being this the intention of the Project Production of Hydrogen from the Biomass Proceeding from the Residues of the Plant of Banana by means of Catalytic Gasification in Supercritical Water, inside which the present work places.

The reaction of hydrolysis that will drive us to reach the raised aim was effected by each of the parts of the plant, using dilutions of sulphuric acid in concentrations of 3, 6 and 10 % v/v, with times of reaction of 15, 30 and 60 min, temperatures of 60 and 93°C.

The results obtained of this reaction, they were analyzed by means of the reading of the degrees Brix as measure of reference of the soluble sugars in the liquid. Analysis Dissolved Organic Carbon (DOC) to determine the quantity of carbon dissolved and by means of High-performance Liquid Chromatography (HPLC) to identify and to quantify the present sugar.

The best quantity of glucose was in the pseudo stem, when the sulfuric acid hydrolysis process was used diluted varying its concentration, temperature and reaction time.

**KEYWORDS:** biomass, banana, hydrolysis, optimization, performance, glucose.



## ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT .....	3
ÍNDICE .....	4
LISTA DE TABLAS .....	6
LISTA DE GRÁFICOS .....	7
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	8
LISTA DE ANEXOS.....	9
CLAUSULA DE DERECHOS DE AUTOR.....	10
CLAUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL .....	11
DEDICATORIA .....	12
AGRADECIMIENTOS.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	16
1.1 Biomasa lignocelulósica.....	16
1.2 Componentes del material lignocelulósico.....	16
1.2.1 Celulosa.....	18
1.2.2 Hemicelulosa .....	19
1.2.3 Lignina .....	21
1. 3 Especies de banano y su producción en ecuador.....	22
1.3.1 Clasificación de las especies de banano.....	22
(Instituto Nacional de Preinversión, 2014) 1.3.2 Condiciones agroecológicas para el cultivo de banano.....	24
1.4 Identificación de las potenciales zonas de cultivo del banano .....	24
1.5 Morfología de la planta de banano .....	26
1.6 Composición de los residuos de la planta de banano .....	30
1.7 Aprovechamiento de la biomasa de los residuos de la planta de banano.....	32
1.8 Hidrólisis de la biomasa .....	33



1.9 Variables del proceso de hidrólisis.....	35
1.9.1 <i>Temperatura</i> .....	35
1.9.2 <i>Tiempo de reacción</i> .....	35
1.9.3 <i>Concentración de ácido</i> .....	36
1.10 Cinética del proceso de hidrólisis.....	36
1.11 Productos de reacción .....	37
1.12 Condiciones favorables de la hidrólisis ácida .....	37
1.12 Tratamiento previo a la hidrólisis ácida.....	38
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
2.1. Identificación de las zonas de cultivo de banano en ecuador .....	39
2.1.1 <i>Materiales</i> .....	39
2.1.2 <i>Método</i> .....	39
2.2 Muestreo de la biomasa.....	40
2.2.1 <i>Materiales</i> .....	41
2.2.2 <i>Metodología del muestreo</i> .....	41
2.3 Pre-tratamiento de la biomasa recolectada.....	45
2.3.1 <i>Secado de la biomasa</i> .....	45
2.3.2 <i>Determinación de Humedad</i> .....	47
2.3.3 <i>Molido de la biomasa</i> .....	48
2.4 Análisis físico y químico-elemental de las muestras.....	49
2.4.1 <i>Metodología caracterización física de las muestras</i> .....	49
2.4.2 <i>Metodología para el análisis químico-elemental de las muestras</i> .....	49
2.5 Hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico diluido .....	50
2.6 Cromatografía líquida de alto rendimiento.....	53
CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	56
3. 1 Recolección de la biomasa .....	57
3.2 Secado de la biomasa.....	57
3.3 Molienda de la biomasa .....	58
3.4 Resultados del análisis proximal y elemental de la muestra seca.....	58
3.4 Resultados del proceso de hidrólisis .....	59



3.4.1 Resultados obtenidos de la reacción de hidrólisis mediante medición de grados Brix .....	59
3.4.2 Resultados obtenidos de carbono orgánico disuelto para la solución resultante de la reacción de hidrólisis .....	61
3.4.3 Resultados obtenidos mediante HPLC para las soluciones resultantes de la reacción de hidrólisis de las diferentes partes de la planta de banano.....	64
3.5 Análisis comparativo de los resultados obtenidos con los distintos métodos de lectura.....	68
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
4.1 Conclusiones .....	70
4.2 Recomendaciones .....	71
ANEXOS.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las Especies de banano. ....	23
Tabla 2: Análisis de la producción de banano, residuos y su potencial energético.....	24
Tabla 3: Producción de banano, residuos agrícolas y potencial energético en tres cantones de las provincias de Los Ríos, El Oro y Guayas. ....	25
Tabla 4: Caracterización física y química de las diferentes partes morfológicas de la planta de banano Dwarf Cavendish (Musa acuminata Colla). ....	31
Tabla 5: Composición química y elemental de algunos componentes morfológicos de la planta de banano. ....	32
Tabla 6: Condiciones óptimas de reacción de hidrólisis ácida para diferentes tipos de biomasa.....	38
Tabla 8: Concentración de estándares de calibración.....	55
Tabla 9: Condiciones para la operación de HPLC de las muestras de hidrólisis.. ....	55
Tabla 10: Humedad de las diferentes partes de la planta de banano.....	57
Tabla 11: Porcentajes de material perdido en el proceso de molienda. ....	58
Tabla 12: Análisis proximal y elemental de los residuos de la planta de banano.....	58
Tabla 13: Resultados reacción de hidrólisis al 3% v/v de ácido sulfúrico y temperatura de 93°C. ....	60
Tabla 14: Resultados reacción de hidrólisis al 6% v/v de ácido sulfúrico y 93°C.....	60



Tabla 15: Resultados de la reacción de hidrólisis al 10% v/v de ácido sulfúrico y 93°C.	61
Tabla 16: Contenido de carbono orgánico disuelto en los líquidos obtenidos de la hidrólisis.	62
Tabla 17: Resultados del HPLC para el raquis con las diferentes concentraciones de ácido.	64
Tabla 18: Resultados del HPLC para las hojas con las diferentes concentraciones de ácido.	65
Tabla 19: Resultados del HPLC para las nervaduras con las diferentes concentraciones de ácido.	65
Tabla 20: Resultados del HPLC para el pseudotallo con las diferentes concentraciones de ácido.	66
Tabla 21: Resultados del HPLC para el centro del pseudotallo con las diferentes concentraciones de ácido.	67
Tabla 22: Resultados del rendimiento a glucosa a partir de los gramos de biomasa...	67
Tabla 23: Tabla resumen de grados Brix, DOC y HPLC de las diferentes muestras obtenidas de la reacción de hidrólisis.	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1: Producción de banano y residuos en cantones de las provincias de Los Ríos, Guayas y El Oro.	25
Gráfica 2: Comportamiento las diferentes partes de los residuos de la planta de banano frente al cambio de concentración de ácido sulfúrico.	62
Gráfica 3: Comparación de los resultados de la hidrólisis del raquis con diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.	64
Gráfica 4: Comparación de los resultados de la hidrólisis del pseudotallo con diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.	66
Gráfica 5: Comparación de método Brix con HPLC	69
Gráfica 6: Comparación análisis DOC con HPLC.	69



## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema general de los componentes químicos del material lignocelulósico..	17
Ilustración 2: Estructura de la cadena de celulosa..	18
Ilustración 3: Tipos de organización de las fibras de celulosa.	19
Ilustración 4: Estructura de la hemicelulosa..	20
Ilustración 5: Modelo de la interacción de los componentes de la pared celular. Las barras paralelas representan fibras de celulosa entrelazadas por las cadenas de hemicelulosa (unidas entre sí por puentes diferúlicos) y proteínas estructurales.	20
Ilustración 6: Ejemplo de la estructura de la lignina de madera aserrada.	21
Ilustración 7: Planta de banano.	26
Ilustración 8: Sistema radicular de la planta de banano.	27
Ilustración 9: Rizoma de la planta de banano.	27
Ilustración 10: Pseudotallo de la planta de banano..	28
Ilustración 11: Retoño planta de banano (Hijo espada).	28
Ilustración 12: Hojas planta de banano..	29
Ilustración 13: Inflorescencia planta de banano..	30
Ilustración 14: Mecanismo de ruptura del enlace B (1 ----4) de la celulosa en medio ácido.	34
Ilustración 15: Diagrama de Temperatura vs tiempo de cocción de un proceso hidrotérmico.	35
Ilustración 16: Ubicación de la Hacienda La Clementina.	40
Ilustración 17: Hacienda Clementina.	42
Ilustración 18: Investigador de la Universidad de Cuenca en el destaje del pseudotallo para la toma de muestra..	42
Ilustración 19: Raquis y hoja de la planta de banano..	43
Ilustración 20: Raquis, hojas y pseudotallo de la planta de banano..	43
Ilustración 21: Racimo de banano en planta..	44
Ilustración 22: Retoño planta de banano.	44
Ilustración 23: Segmentos del pseudotallo con las dimensiones establecidas..	46
Ilustración 24: Segmentos del raquis con las dimensiones establecidas.	46
Ilustración 25: Muestra del pseudotallo después del secado.	46
Ilustración 26: Biomasa después de la molienda.	49





Ilustración 27: Pesado de la biomasa para la reacción de hidrólisis.....	51
Ilustración 28: Calentamiento de la biomasa + solución de ácido..	52
Ilustración 29: Reacción de hidrólisis..	52
Ilustración 30: Filtrado de la solución obtenida de la reacción de hidrólisis. ....	52
Ilustración 31: Líquido final obtenido de la reacción de hidrólisis..	53
Ilustración 32: Almacenamiento de las muestras resultantes de la hidrólisis en refrigeración a 4°C. ....	53
Ilustración 33: Diagrama del proceso de optimización de la reacción de hidrólisis.....	56

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa del ecuador con sus cantidades de residuos bananeros .....	72
Anexo 2: Tabla de resultados reacción de hidrólisis sin calentamiento. ....	73
Anexo 3: Resultados de hidrólisis a 60 °C y diferentes tiempos de reacción.....	74
Anexo 4:Cromatogramas obtenido mediante HPLC para el raquis .....	75
Anexo 5: Cromatogramas obtenido mediante HPLC para las hojas.....	76
Anexo 6:Cromatogramas obtenido mediante HPLC para las nervaduras.....	77
Anexo 7: Cromatogramas obtenido mediante HPLC para el pseudotallo .....	78
Anexo 8: Cromatogramas obtenido mediante HPLC para el centro del pseudotallo ..	79

## CLAUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

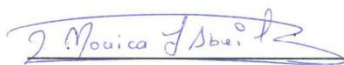


Universidad de Cuenca  
Clausula de derechos de autor

---

Yo, *Mónica Fernanda Abril González*, autora de la tesis "OPTIMIZACIÓN DE LA REACCIÓN DE HIDRÓLISIS DE LOS RESIDUOS DE LA PLANTA DE BANANO, PARA MAYOR RENDIMIENTO A GLUCOSA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Química. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 04 de octubre del 2016



Mónica Fernanda Abril González

C.I: 0106529688



## CLAUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Clausula de propiedad intelectual

---

Yo, Mónica Fernanda Abril González, autora de la tesis “OPTIMIZACIÓN DE LA REACCIÓN DE HIDRÓLISIS DE LOS RESIDUOS DE LA PLANTA DE BANANO, PARA MAYOR RENDIMIENTO A GLUCOSA”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 04 de octubre del 2016

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Mónica F. Abril G.".

Mónica Fernanda Abril González

C.I: 0106529688



## DEDICATORIA

Con todo el cariño dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mis padres Jorge y Milanda, por su apoyo incondicional, por sus consejos, sus valores y todo su amor.

A mis hermanas Alejandra y Andreita, porque siempre están a mi lado con su gran cariño.

A David por ser mi gran apoyo y por toda la felicidad compartida.

A toda mi familia y amigos por su gran cariño.

**Mónica Fernanda Abril G,**



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres por su apoyo y amor incondicional.

A la Ingeniera Silvana Zalamea, directora de mi tesis, por compartir sus conocimientos y su valioso tiempo en la conducción de esta investigación, pero sobretodo por su paciencia y amistad a lo largo de este trabajo.

Al Dr. Jaime Soler, a los Ingenieros William Mejía, José Serrano, a todo el grupo del Proyecto Producción de Hidrógeno, por todo su apoyo y su amistad.

A Gaby Palacios por ser una gran amiga y por todo su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A la Secretaria de Educación Superior Ciencia Tecnología e Innovación – SENESCYT y al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables –INER, por hacer posible la realización de esta investigación.

**Mónica Fernanda Abril González**



## INTRODUCCIÓN

Actualmente la búsqueda de nuevas fuentes de bioenergía, se encuentra en gran desarrollo, debido a que puede reemplazar en parte el uso de los combustibles fósiles contribuyendo a la diversificación de la energía de los países, a la protección ambiental y a la apropiación de tecnologías de energías emergentes. El material lignocelulósico es atractivo debido a su bajo costo y a su alta disponibilidad en diversos climas y localidades, sin embargo el principal impedimento para su utilización es la falta de una tecnología de bajo costo que pueda degradar los polisacáridos presentes en la biomasa de manera que el material lignocelulósico pueda ser convertido en azúcares solubles.

Ecuador es un país con alto potencial agrícola por lo que la biomasa residual puede ser un elemento de gran provecho, siendo la producción de banano una fuente de generación de biomasa residual con un alto volumen de producción ya que aproximadamente el 30% de la oferta mundial de banano proviene de Ecuador, convirtiéndose en el mayor exportador en el mundo y cosechando una superficie aproximada de 214,000 ha. (Instituto de promoción de Exportaciones e Inversiones, 2015). Los desperdicios de banano constituidos por el raquis, pseudotallo, hojas y nervaduras, no tienen mayor uso que el de ser abono para la misma planta, en un porcentaje muy pequeño. Una planta de banano al momento de su cosecha debe tener un peso promedio de 100 kg de los cuales 15 kg representan las hojas, 50 kg representa el pseudotallo, 33 kg de banano y 2 kg de raquis (Valenzuela, 2012). Esto indica que el 67% del volumen total de producción lo constituyen los desechos que no son aprovechados sistemáticamente, convirtiéndose en un foco de contaminación.

Al brindar la tecnología adecuada que aproveche estos residuos de biomasa se beneficiará a las empresas bananeras de manera tal que además de eliminar los desechos de sus plantaciones, estos podrían considerarse una fuente de ingresos o generación de bioenergía útil en sus instalaciones.

La presente investigación permitirá la optimización de la reacción de hidrólisis de la biomasa proveniente de los residuos de la planta de banano en agua a temperatura subcrítica, en condiciones ácidas, con el fin de degradar los polisacáridos presentes y convertirlos en azúcares reductores principalmente glucosa, que es el reactivo para la siguiente etapa del proyecto "Producción de Hidrogeno a Partir de la Biomasa Procedente de los Residuos de la Planta de Banano mediante Gasificación Catalítica en Agua a Temperatura Supercrítica" que comprende la reacción de gasificación catalítica para la obtención de hidrogeno como biocombustible.



## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

**OBJETIVO GENERAL:** Determinar los valores de las variables que optimizan la reacción de hidrólisis hacia el mayor rendimiento a glucosa.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Determinar el tiempo de reacción óptimo en el proceso de hidrólisis.
- Determinar la temperatura óptima para la reacción.
- Establecer una base de datos con los resultados de este proceso para la posterior comparación con los que se obtendrán en condiciones supercríticas.



## **CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Biomasa lignocelulósica**

Se puede definir a la biomasa como un conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal o animal. (Ana & Flor, 2014)

Existen 3 grupos principales de biomasa que son:

- Biomasa Natural: La que se produce en la naturaleza sin intervención humana, como por ejemplo, bosques, árboles, matorrales, etc.
- Biomasa procedente de cultivos energéticos: Son campos de cultivo donde se produce un tipo de especie con la única finalidad de su aprovechamiento energético.
- Biomasa residual: Es aquella generada debido a la actividad humana, abarcando a los residuos agrícolas, forestales, los procedentes de industrias ya sean agrícolas o forestales y biodegradables.

La biomasa constituye la plataforma química para la fabricación de biocombustibles y productos químicos. Especialmente los residuos lignocelulósicos (por ejemplo: paja, tallos, bagazo) parecen ser particularmente adecuados, ya que no compiten con la alimentación animal y la industria alimentaria.

### **1.2 Componentes del material lignocelulósico**

La lignocelulosa es el principal y más abundante componente de la biomasa producida por la fotosíntesis. La pared celular de las plantas está formada por lignocelulosa, la composición y porcentajes de los polímeros varían entre las especies de plantas, incluso entre la edad y la etapa de crecimiento. (Jeffries, 1994)

Evidentemente la celulosa, hemicelulosa y lignina son los principales constituyentes de la pared celular de fibras de plantas.

La composición del material lignocelulósico se puede expresar según Tim Rogalinski, Thomas Ingram y Gerd Brunner, de la siguiente manera:



- Celulosa: 34 - 50%.
- Hemicelulosa: 19 - 34%.
- Lignina: 11 – 30%.

La planta está compuesta por diferentes capas que se diferencian de acuerdo a su estructura y composición química (Ilustración 1). Básicamente la celulosa forma el esqueleto de la planta, este se encuentra rodeado de otra sustancia que funciona como matriz (hemicelulosa) y de materiales incrustantes (lignina). (Rogalinski, Ingram, & Brunner, 2008).

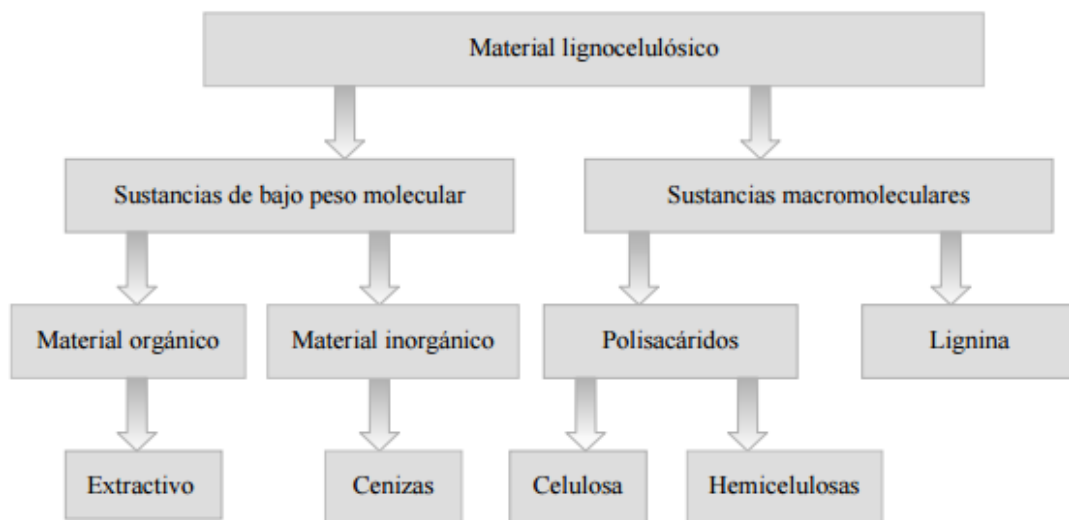


Ilustración 1: Esquema general de los componentes químicos del material lignocelulósico. Fuente: (Gellerstedt G. 2009, citado en Carchi D. 2014).

Los 3 constituyentes principales del material lignocelulósico son susceptibles de separación. Estos componentes por si solos o mediante sus derivados permiten obtener productos de mayor valor añadido.

De la celulosa se pueden derivar polímeros celulósicos, que son de utilidad para la fabricación de papel y otros, además es susceptible de hidrolizarse hasta sus monómeros constituyentes para obtener medios fermentables que posteriormente se pueden utilizar para la elaboración de biocombustibles.

De las hemicelulosas y sus azúcares monoméricos derivados (pentosas) se pueden obtener también medios fermentables, pero en este caso existe mayor cantidad de monómeros y oligómeros, por lo que pueden obtenerse productos como el xilitol, el ácido acético y el furfural.

Para el caso de la lignina uno de sus usos es como combustible que se aplica en el sector de la pasta celulósica, el papel y que supone una valorización energética de la fracción residual. (López, García, Fera, Zamudio, & Pérez, 2010).

### 1.2.1 Celulosa

La celulosa es el componente principal de los tejidos vegetales, constituyendo la base estructural de los mismos.

Su fórmula química es  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , siendo un homopolímero lineal constituido por unidades de  $\beta$  – glucosa, unidos mediante enlaces  $\beta$  – 1, 4-glucosídicos. La cadena de celulosa es alargada y las unidades de glucosa están dispuestas en un solo plano debido a la presencia del anillo glicosídico, unidas por puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals intramoleculares (Ilustración 2). (Fengel & Gerd, 1984).

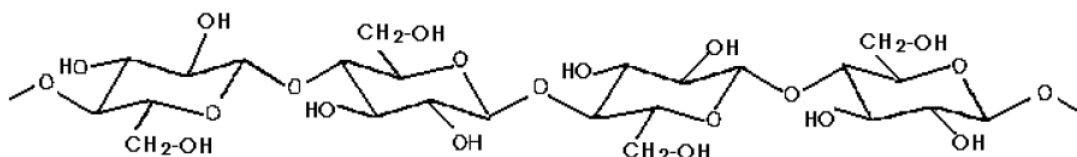


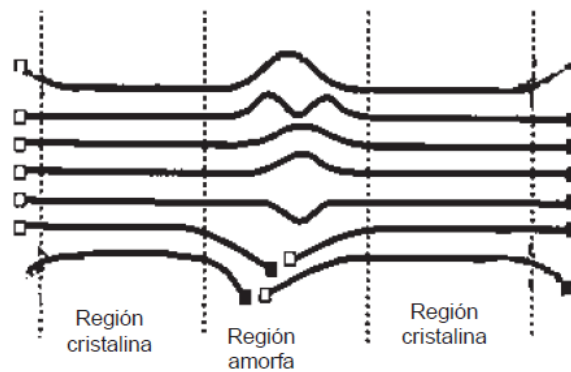
Ilustración 2: Estructura de la cadena de celulosa. Fuente: (López, García, Fera, Zamudio, & Pérez, 2010).

Los extremos del polímero son asimétricos, los que contienen el carbón anomérico (C1) libre de la molécula de glucosa pueden reducir a un gran número de oxidantes por lo que se conocen como extremos reductores, mientras que el C4 con un radical hidroxilo libre es el extremo no reductor.

La estructura tridimensional que forman las moléculas de glucosa forman una estructura conocida como protofibrilla, esta a su vez se asocia con otras protofibrillas para formar la fibrilla de celulosa, finalmente las fibrillas se asocian entre ellas para formar las fibras de celulosa que se entrelazan mediante interacciones no covalentes con la hemicelulosa y lignina.

Dentro de las fibras de celulosa existen regiones cristalinas, estas se deben a la organización de los componentes moleculares de las microfibrillas que se encuentran muy compactas mediante puentes de hidrógeno y también existen regiones desordenadas conocidas como amorfas, estas están compuestas de estructuras secundarias, que se encuentran en menor proporción dentro del arreglo molecular de la celulosa, tales como microfibrillas en forma de roscas o vueltas o regiones vacías que dan forma a microporos superficiales, grandes hoyos y capilares (Ilustración 3), por esta

razón esta región es menos compacta que la cristalina por lo que tiene la capacidad de absorber moléculas de agua que le confieren gran flexibilidad y cierta solubilidad. Las regiones menos organizadas se conocen como celulosa para-cristalina. (Claudia Martínez-Anaya, 2008).



*Ilustración 3: Tipos de organización de las fibras de celulosa. (Claudia Martínez-Anaya, 2008)*

### 1.2.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido que recubre las fibras de celulosa y permite el enlace de pectina, se diferencia de la celulosa en su estructura, ya que ésta no es homogénea y los diferentes azúcares se encuentran formando cadenas más cortas y con ramificaciones (Ilustración 4).

Está formada de pentosas (xilosa y arabinosa), hexosas (glucosa, galactosa y manosa) y compuestos fenólicos (como el ácido ferúlico y p-cumárico).

Las hemicelulosas son dispersas lo que significa que tienen un grado de polimerización variable, su estabilidad térmica y química es generalmente inferior a la de la celulosa, siendo soluble en álcalis y fácilmente hidrolizada por ácidos. (Wilder & Albersheim, 1973).

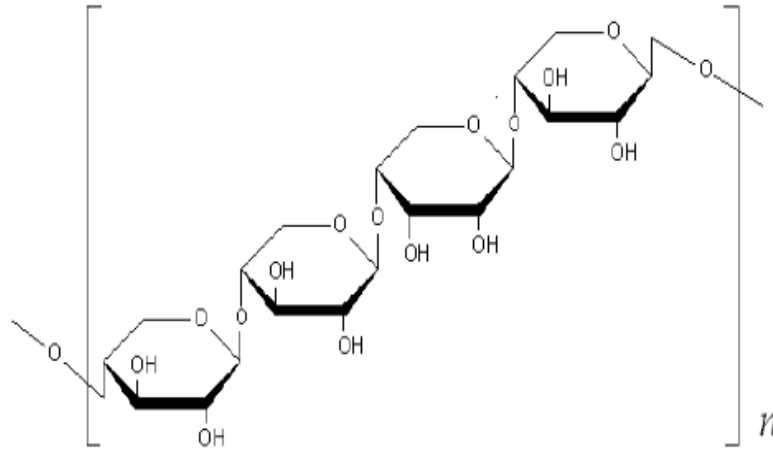


Ilustración 4: Estructura de la hemicelulosa. (Cardona, 2010).

Se considera que las moléculas de hemicelulosa se encuentran altamente entrecruzadas mediante puentes diferúlicos formando una red en la que se encuentran embebidas las microfibrillas de celulosa (Ilustración 5), al tiempo que proteínas de la pared celular también forman puentes con el ácido ferúlico dándole gran resistencia e insolubilidad a toda la estructura. Estas propiedades junto con la lignina contribuyen a la alta recalcitrancia de los materiales lignocelulósicos.

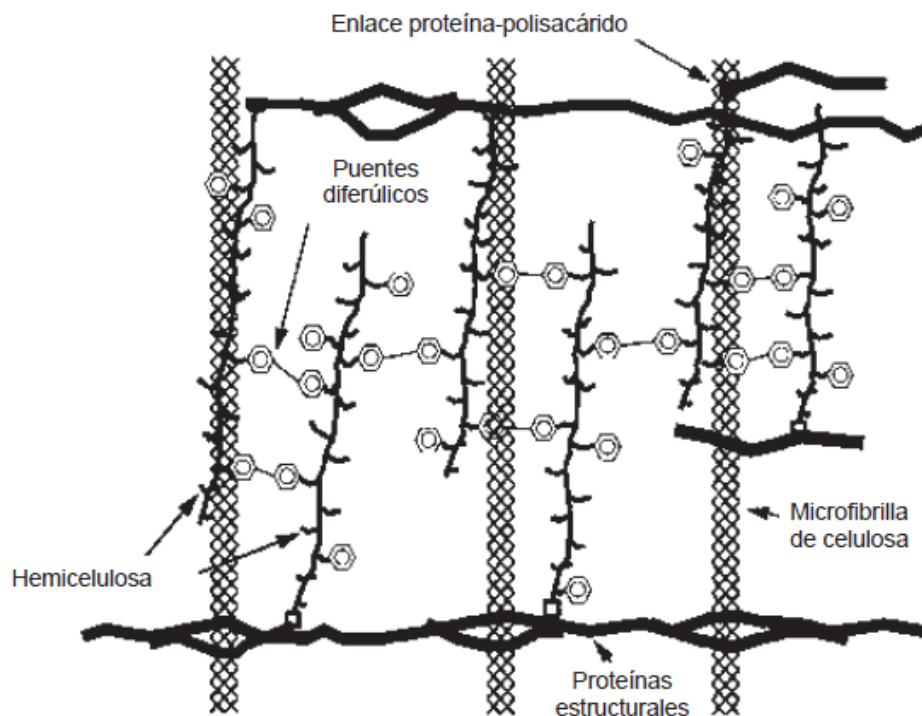


Ilustración 5: Modelo de la interacción de los componentes de la pared celular. Las barras paralelas representan fibras de celulosa entrelazadas por las cadenas de hemicelulosa (unidas entre sí por puentes diferúlicos) y proteínas estructurales. Fuente: (Carchi, 2014)

La hemicelulosa puede ser extraída por soluciones alcalinas (por ejemplo KOH al 15%), precipitando una parte (xilanos y hemicelulosa tipo A) cuando la solución es neutralizada y otra parte de bajo peso molecular (polisacáridos ácidos o hemicelulosa tipo B) al añadir etanol. (Pettersen, 1984).

### 1.2.3 Lignina

Es el segundo polímero más abundante de la naturaleza después de la celulosa, su función en el ámbito estructural, es el de mantener unidos la celulosa y las hemicelulosas entre sí, además de brindar dureza a las paredes celulares, en conjunto sirven como soporte mecánico para construir el tallo y rama.

Su estructura es compleja siendo un polímero amorfo ramificado y heterogéneo formado por unidades de fenilpropano (p-coumaril, coniferil and alcohol sinapílico) unidos por diferentes tipos de enlaces inter unitarios que incluyen varios enlaces éter (C-O-C) y de carbono-carbono (C-C) aleatoriamente distribuidos. (Ilustración 6) (Guarnizo, Martínez, & Valencia, 2009).

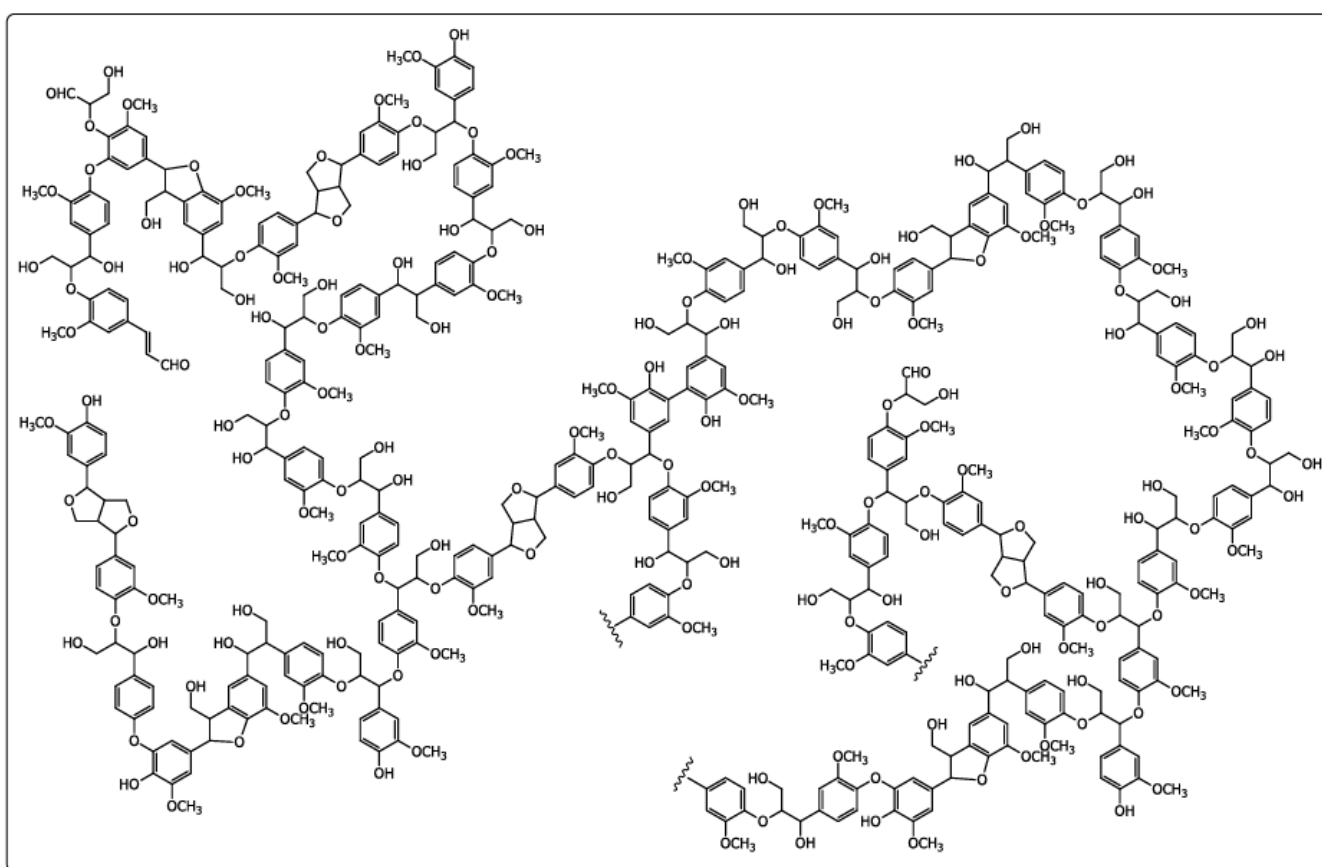


Ilustración 6: Ejemplo de la estructura de la lignina de madera aserrada. Fuente: (López, García, Fera, Zamudio, & Pérez, 2010)



Entre las propiedades más importantes de la lignina tenemos que:

- Son resistentes a la hidrólisis ácida.
- Fácilmente oxidable.
- Solubles en bisulfito o álcalis calientes.
- Fácilmente condensables con fenoles o tioles.
- Cuando se colocan a ebullición en una solución etanólica de ácido clorhídrico, las ligninas forman monómeros del tipo "cetonas de Hibber" (mezcla de cetonas aromáticas resultantes de la ruptura de los principales enlaces éter ( $\beta$ -O-4) entre unidades de lignina) (Lu & John, 2010).

El uso actual que se le da a la lignina es principalmente para energía como combustible de calderas en la industria papelera, mientras que únicamente un 1 al 2% se aísla del licor negro y se destina para usos industriales diversos como biodispersantes, resinas fenólicas, fabricación de tableros aglomerados y contrachapados. (Lora & Glasser , 2002).

### **1. 3 Especies de banano y su producción en ecuador**

#### **1.3.1 Clasificación de las especies de banano**

El banano es una fruta altamente nutritiva, muy popular por su aroma, textura, facilidad de pelar y comer, además es rico en potasio y calcio, a la vez que posee bajos niveles de sodio. (Debabandya, Sabyasachi, & Namrata, 2010).

Su clasificación se detalla en la tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de las Especies de banano.

FAMILIA: Musácea				
GENERO: Musa				
SECCIÓN: EUMUSA				
Especies	Grupo	Subgrupo	Clones	Otros Nombres
<b>Musa Acuminata</b>	Diploide AA	Sucrier	Baby banano	Lady's Finger
		Gross Michel	Gross Michel	Orito
	Triploide AAA	Cavendish	Gran Naine	Gran enano
			Dwarf Cavendish	Cavendish
			Valery	Robusta
			Lacatán	Filipino
			Williams	
			Rojo y Rojo-verde	Morado
<b>Musa Balbisiana</b>	Triploide AAB	Plantain	French Plantain	Dominico
			Horn Plantain	Barraganete
			Dominico Harton	
			Maqueño	
			Manzano	
			Limeño	
	Triploide ABC	Plantain	Cuatrofilios	
			Pelipita	
	Tetraploides AAAB		FHIA 4	
			FHIA 21	

Fuente: (PRO-ECUADOR, 2001)

De acuerdo al Censo Nacional Agropecuario del año 2000 y las Encuestas de Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2012, la producción de banano en el Ecuador alcanzó un total de 7.012.244 t/año de fruta fresca cultivadas en una extensión de 221.775 ha.

Más del 70% de la producción agrícola de banano se encuentra localizada en las provincias de El Oro y Los Ríos. Las variedades cultivadas en el país son Musa Cavendish, Musa Enana, Gros Michel, Lacatán (Musa Acuminata).

Los residuos producidos por este tipo de cultivo pueden ser clasificados en:

- **Originados en el campo (plantaciones):** el pseudotallo y las hojas.
- **Originados en el procesamiento (empacadoras):** raquis y rechazos de la fruta.

Después de la cosecha, una gran cantidad de residuos agrícolas se producen siendo usados como fertilizantes orgánicos para los suelos. En términos de materia seca, la variedad *Cavendish* produce alrededor de 8 t/año de pseudo tallos, 7.7 t/año de hojas y 0.5 t/año de tallos florales, constituyendo un gran potencial para usos energéticos. (Soffner, 2001).

### 1.3.2 Condiciones agroecológicas para el cultivo de banano

#### Requerimientos climáticos y edáficos

**Altitud:** 0 a 300 msnm.

**Temperatura:** 21 a 30°C.

**Precipitación:** 100 mm a 180 mm.

**Luminosidad:** 1200 mm a 1400 horas/luz/año con 3-4 horas/luz diaria.

**Suelo:** Franco arenoso, franco arcilloso, franco arcillo limosa y franco limosa.

**PH:** 6.0 a 7.5. (INIAP, 2014)

### 1.4 Identificación de las potenciales zonas de cultivo del banano

El trabajo comienza por la identificación de las principales zonas de cultivo de banano, con mayor producción de residuos agrícolas. Según el Atlas Bioenergético del Ecuador 2014, las principales zonas de siembra de esta fruta se encuentran localizadas en la región costa, concentrándose principalmente en las provincias de Los Ríos, El Oro, Guayas, Cañar, Cotopaxi, Manabí, Esmeraldas y Santo Domingo de los Tsáchilas. La tabla N° 2, presenta un análisis de la producción de banano y sus residuos.

**Tabla 2: Análisis de la producción de banano, residuos y su potencial energético.**

PROVINCIA	PRODUCCIÓN t/año	RESIDUOS t/año
Cañar	213.271,60	140.759,26
Cotopaxi	113.400,30	74.844,20
El Oro	2.202.073,79	1.453.368,70
Esmeraldas	30.809,44	20.334,23
Guayas	1.665.723,71	1.099.377,65
Los Ríos	3.103.632,96	2.048.397,75
Manabí	223.610,67	147.583,04

**Fuente:** (Instituto Nacional de Preinversión, 2014)

En función de la información anterior se puede discernir que las provincias que presentan altos índices de producción de residuos agrícolas son: Los Ríos, El Oro y Guayas.

Una vez identificadas las provincias es necesario enfocar la identificación pasando de un nivel provincial a un nivel cantonal. Así, en las provincias seleccionadas se identificaron a los siguientes cantones, tabla N° 3:



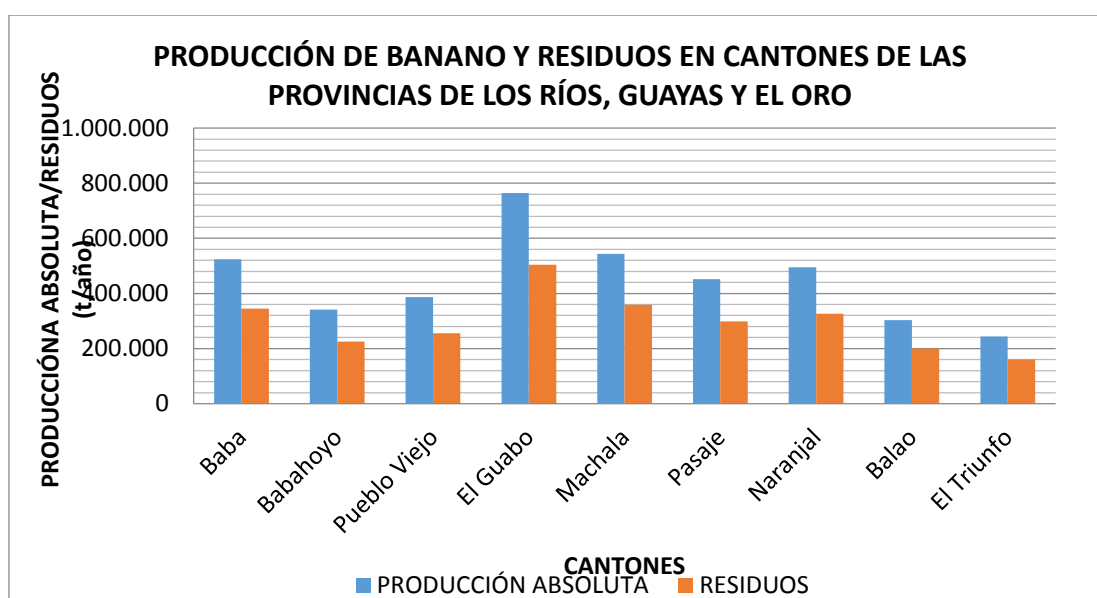
**Tabla 3: Producción de banano, residuos agrícolas y potencial energético en tres cantones de las provincias de Los Ríos, El Oro y Guayas.**

PROVINCIA DE LOS RÍOS					
CANTON	PRODUCCIÓN ABSOLUTA t/año	DENSIDAD DE PRODUCCIÓN t/km2/año	RESIDUOS t/año	DENSIDAD DE RESIDUOS t/km2/año	ÁREA km2
Baba	523.374,15	1.012,26	345.426,94	668,09	517,03
Babahoyo	341.258,86	314,01	225.230,85	207,25	1.086,77
Pueblo Viejo	386.578,60	1152,32	255.141,94	760,53	335,48
PROVINCIA DE EL ORO					
El Guabo	763.774,69	1.265,80	504.091,16	835,43	603,39
Machala	543.692,34	1.680,82	358.836,95	1.109,34	323,47
Pasaje	452.352,43	992,13	298.552,60	654,81	455,94
PROVINCIA DEL GUAYAS					
Naranjal	494.475,94	285,48	326.354,12	188,42	1.732,07
Balao	302.877,79	740,34	199.899,34	488,63	409,10
El Triunfo	243.467,52	615,72	160.688,56	406,37	395,42

**Fuente:** (Instituto Nacional de Preinversión, 2014)

Debe notarse que la densidad de residuos del cultivo de banano es un indicador que se basa en el área del cantón. Por tanto, cantones con gran extensión territorial que presenten elevadas cantidades de desechos podrían tener menor densidad de residuos que otros cantones con una pequeña extensión territorial.

Esta información se encuentra plasmada en la gráfica N° 1.



**Gráfica 1: Producción de banano y residuos en cantones de las provincias de Los Ríos, Guayas y El Oro. Fuente: Autor.**

Un criterio para seleccionar los emplazamientos puede basarse en la cantidad de residuos producidos por año (Voivontas, Assimacopoulos, & Koukios, 2001). Como línea base se tomará un valor de 250.000 t/año de residuos (media de producción de residuos de los cantones seleccionados). Los cantones que estén por sobre este valor serán seleccionados.

Con la información anterior, los cantones seleccionados fueron: Pueblo Viejo, Baba, El Guabo, Machala, Pasaje, Naranjal. Como se observa, la selección ha incluido a tres cantones de la provincia de El Oro, dos cantones de la provincia de Los Ríos y un cantón de la provincia del Guayas. Esta selección también resulta beneficiosa para un posterior muestreo, ya que se tiene un conjunto muestral representativo a nivel de país.

### 1.5 Morfología de la planta de banano

En la Ilustración N° 7, se puede observar de manera general a la planta de banano con cada una de sus partes.

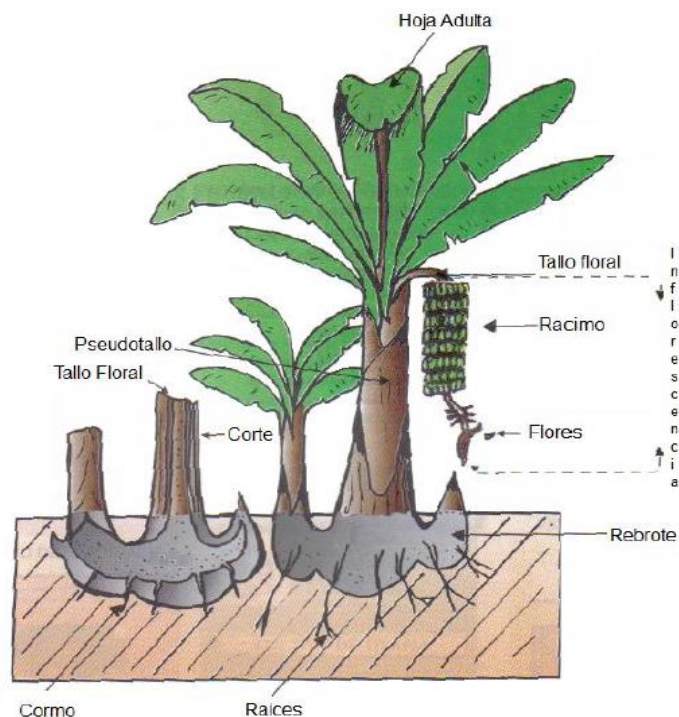
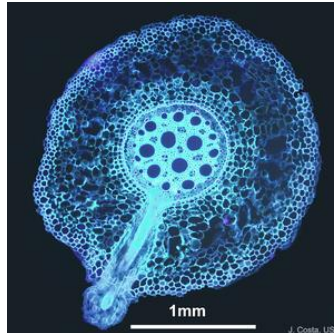


Ilustración 7: Planta de banano. (ProMusa, 2015)

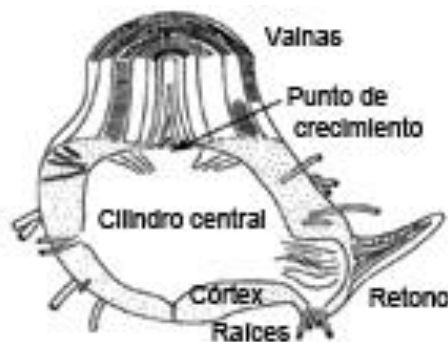
Las plantas de banano constan de las siguientes partes:

- **Sistema radicular:** Está formado por un eje en donde se producen las primeras raíces y a partir de estas se forman las secundarias. Este sistema es el encargado de absorber y transportar el agua hacia la planta así como los nutrientes necesarios. (Ilustración 8).



*Ilustración 8: Sistema radicular de la planta de banano. Fuente: (Musarama, 2015)*

- **Rizoma:** Es el tallo verdadero de la planta y se encuentra bajo tierra. También se le conoce como cormo y es el encargado de alojar a los retoños de la planta. (Ilustración 9).



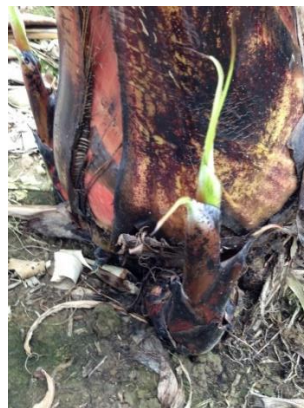
*Ilustración 9: Rizoma de la planta de banano. Fuente: (ProMusa, 2015)*

- **Pseudotallo:** Falso tallo formado por un conjunto de vainas foliares superpuestas. Está formado principalmente por agua, siendo bastante fuerte, contando con la capacidad de soportar el racimo de banano. (Ilustración 10).



*Ilustración 10: Pseudotallo de la planta de banano. Fuente: Autor.*

- **Retoño:** Se trata de un brote lateral que se desarrolla del rizoma. Morfológicamente hablando existen dos tipos de retoños: el hijo espada, este tiene hojas estrechas y un rizoma grande, y el hijo de agua que tiene hojas anchas y un rizoma pequeño, estos tienen una conexión débil con la madre y no se desarrollan como plantas fuertes. El retoño seleccionado para reemplazar a la planta madre, después de la fructificación se llama **seguidor**. (Ilustración 11).



*Ilustración 11: Retoño planta de banano (Hijo espada). Fuente: Autor.*

- **Hojas:** La planta de banano tiene hojas que pueden alcanzar hasta los 2m de largo. Nacen a partir del pseudotallo mediante una estructura enrollada simulando un tronco aparente, como se muestra en la ilustración 12. Cada una de estas hojas tiene un sistema de nervaduras y un peciolo que sirve de acoplamiento al pseudotallo.



*Ilustración 12: Hojas planta de banano. Fuente: Autor.*

- **Inflorescencia:** Es una estructura compleja que contiene las flores de las que se desarrollaran los frutos. Se apoya en el tallo floral que es el verdadero tallo de la planta y este es producido desde el punto de crecimiento terminal del rizoma y crece a través del pseudotallo. (Ilustración 13).
- **Las flores femeninas** aparecen primero y se desarrolla conjuntamente con los racimos del fruto.  
La porción distal de la inflorescencia se alarga y produce grupos de flores masculinas las mismas que producen polen.
- **Péndulo:** Es el tallo que soporta la inflorescencia y la fija al rizoma.
- **Racimo:** Es el conjunto de frutos que aparecen a lo largo del raquis.
- **Raquis:** Es el tallo de la inflorescencia y va desde el primer fruto hasta la yema masculina.
- **Yema masculina:** Contiene las flores masculinas. A medida que los frutos maduran el raquis y la yema masculina continúan creciendo.



*Ilustración 13: Inflorescencia planta de banano. Fuente: Autor.*

## 1.6 Composición de los residuos de la planta de banano

Con objeto de evaluar el potencial como materia prima para diferentes procesos químicos, se ha realizado un estudio de la composición y estructura de los componentes morfológicos principales de la planta de banano de la variedad Dwarf Cavendish (*Musa acuminata* Colla) que crece en la isla de Madeira, Portugal.

Mediante análisis de Inductively Coupled Plasma (ICP) se determinaron los componentes minerales de las diferentes partes de la planta después de una calcinación de las muestras. Se encontró que existe una gran diferencia en la composición química de la planta.

Los mayores extremos fueron encontrados en cuanto a la celulosa (37,7% en las vainas foliares y solamente un 15,7% en el tallo floral), lignina (24,3% en las hojas y 10,5% en el raquis). Todos los componentes morfológicos de la planta contenían una gran cantidad de cenizas. En la tabla 4 se detalla la composición química de las diferentes partes de la planta de banano.



**Tabla 4: Caracterización física y química de las diferentes partes morfológicas de la planta de banano Dwarf Cavendish (*Musa acuminata* Colla).**

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS DIFERENTES PARTES MORFOLÓGICAS DE LA PLANTA DE BANANO (% P/P DE MATERIAL )</b>					
<b>COMPONENTE</b>	<b>Pecíolo</b>	<b>Hojas</b>	<b>Tallo Floral</b>	<b>Vainas Foliares</b>	<b>Raqis</b>
<b>Cenizas</b>	11.6	19.4	26.1	19	26.8
<b>Solventes de extracción</b>	5.9	16.1	17.6	12.6	17.6
<b>Diclorometano</b>	1.2	5.8	1.4	1.4	1.5
<b>Etanol/Tolueno</b>	0.9	2.6	1.1	2.1	1.4
<b>Aguab</b>	3.8	7.7	15.1	9.1	14.7
<b>Lignina</b>	18	24.3	10.7	13.3	10.5
<b>Insolublea</b>	16.8	22	9.8	12.6	9.6
<b>Soluble</b>	1.2	2.3	0.9	0.7	0.9
<b>Holocelulosaa</b>	62.7	32.1	20.3	49.7	37.9
<b>Hemicelulosa Aa</b>	14.8	6.7	2.8	7.2	3.9
<b>Hemicelulosa Ba</b>	6.7	1.9	2.7	4.2	3.6
<b><math>\alpha</math> Celulosaa</b>	39.5	20.7	14.4	37.1	28.4
<b>Celulosaa</b>	31	20.4	15.7	37.3	31
<b>Pentosana</b>	16.2	12.1	8	12.4	8.3
<b>Almidón</b>	0.4	1.1	26.3	8.4	1.4
<b>Proteínas</b>	1.6	8.3	3.2	1.9	2

<sup>a</sup> Corregido para el contenido de cenizas; <sup>b</sup> Corregido para el contenido de almidón.

**Fuente:** (Oliveira, 2007)

Otras investigaciones analizaron el potencial de las plantas de banano como materia prima para la producción de biodiesel y etanol. (Velasquez & Arredondo, 2010). En la tabla 5 se presenta una composición promedio estándar de una planta de banano.

**Tabla 5: Composición química y elemental de algunos componentes morfológicos de la planta de banano.**

MATERIA PRIMA	PULPA DE BANANO	CÁSCARA DE BANANO	TALLO FLORAL
<b>Composición %p/p</b>			
<b>Humedad <math>\pm 1\%</math></b>	74,6	89,1	93,6
<b>Materia seca <math>\pm 1\%</math></b>	25,4	10,9	6,4
<b>Celulosa <math>\pm 0,6\%</math><sup>a</sup></b>		13,2	32,1
<b>Hemicelulosa <math>\pm 2,2\%</math><sup>a</sup></b>		14,8	8,8
<b>Almidón <math>\pm 1,1\%</math><sup>a</sup></b>	53,2	39,9	1,1
<b>Lignina <math>\pm 0,6\%</math><sup>a</sup></b>		14,0	19,0
<b>Azúcares <math>\pm 0,6\%</math><sup>a</sup></b>	4,3		
<b>Composición elemental %p/p</b>			
<b>C</b>	40,5	41,6	38,9
<b>H <math>\pm 0,6\%</math></b>	6,9	6,0	3,0
<b>O <math>\pm 0,6\%</math></b>	49,2	43,0	35,1
<b>Ash <math>\pm 0,6\%</math></b>	3,4	9,4	23,0

<sup>a</sup> Resultados en base seca

**Fuente:** (Velasquez & Arredondo, 2010)

## 1.7 Aprovechamiento de la biomasa de los residuos de la planta de banano

En Ecuador existe la manufactura de productos artesanales de residuos de la planta de banano tales como papel de raquis de banano, cajas ecológicas, etc.

Se han realizado varios trabajos de investigación y adaptación de tecnologías para la utilización de los residuos de planta de banano como es la producción de pre-humus utilizando microorganismos y abono orgánico conocido como Bokashi, fermentado los residuos con microorganismos eficaces, tecnología desarrollado por el doctor Teruo Higa, profesor de agricultura de la Universidad de Ryukyus en Japón.

Hojas y pseudotallos de plátano son fuentes de forraje muy útiles en muchos países tropicales, sobretodo en la época seca. Se pueden triturar y distribuir frescos o se pueden ensilar. El contenido en proteína y minerales es bajo, por lo cual el uso requiere suministrarlos con ingredientes ricos en proteína. (Valenzuela Martínez, 2012)





## 1.8 Hidrólisis de la biomasa

Se puede definir a la hidrólisis como una reacción química en la cual mediante la acción del agua se produce la descomposición de compuestos orgánicos complejos en otros de estructura más sencilla.

Por su parte la hidrólisis ácida es un proceso químico, que utiliza catalizadores ácidos para descomponer las cadenas de polisacáridos que forman la biomasa (celulosa y hemicelulosa) en sus monómeros elementales. Este tipo de hidrólisis puede realizarse empleando diferentes clases de ácidos como el ácido sulfuroso, clorhídrico, sulfúrico, fosfórico, nítrico y fórmico. Sin embargo a escala industrial los más utilizados son el ácido sulfúrico y clorhídrico. (Galbe & Zacchi , 2002).

Los métodos industriales de hidrólisis ácida se agrupan en dos tipos: los que emplean ácidos concentrados (10-30%), trabajan a bajas temperaturas (170-190°C) y mayor tiempo de residencia; y los que utilizan ácidos diluidos (1-5%), a temperaturas más altas (160-240°C).

Los procesos que utilizan ácidos concentrados operan a baja temperatura pudiendo obtenerse rendimientos elevados (superiores al 90% de la glucosa potencial), sin embargo las desventajas de este proceso se deben la gran cantidad de ácido a usar para la impregnación del material a tratar y lo costoso de su recuperación, como también a la corrosión que producen en los equipos, obligando a realizar altas inversiones de equipamiento, volviéndose un proceso no rentable. (Keller, 1996).

Por su parte, los procesos que utilizan ácidos diluidos tienen su principal ventaja en el bajo consumo de ácidos. Sin embargo para alcanzar rendimientos aceptables en la conversión de celulosa a glucosa se requiere utilizar elevadas temperaturas y los tiempos de residencia utilizados son relativamente cortos. Bajo estas condiciones los mejores rendimientos alcanzados están en torno al 60 % del rendimiento teórico. (Oliva Dominguez, Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo., 2003).

En un medio ácido la disociación de polisacáridos se produce fácilmente debido a la ruptura de los enlaces glicosídicos. En la Ilustración N° 14 se muestra el mecanismo de reacción que ocurre en la celulosa; cuando la hidrólisis ocurre en el extremo de una cadena o en trímeros o dímeros se produce la solubilización de la glucosa.

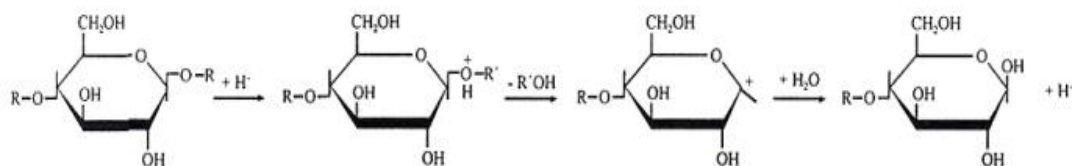


Ilustración 14: Mecanismo de ruptura del enlace B (1 ----4) de la celulosa en medio ácido. Fuente: (Valenzuela Martínez, 2012).

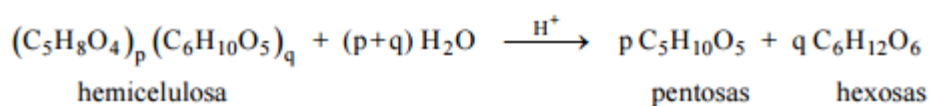
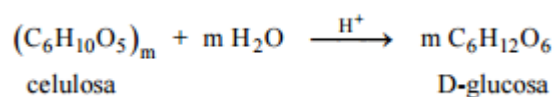
Las hemicelulosas son más susceptibles al ataque ácido debido a que:

- Presentan una estructura más amorfa por sus ramificaciones.
- Los enlaces glicosídicos son más lábiles.
- Presentan menor grado de polimerización.

Los efectos del medio ácido sobre los polisacáridos son:

- Liberación de monómeros.
- Eliminación de grupos acetilo.
- Formación de Furfural y de Hidroximetilfurfural (HMF)

De forma simplificada las reacciones que expresan la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa son las siguientes, (Romero Pulido, 2003):



## 1.9 Variables del proceso de hidrólisis

### 1.9.1 Temperatura

Los procesos de hidrólisis se ven altamente influenciados por la temperatura, en el caso de utilizar ácidos diluidos se necesitaran elevadas temperaturas para lograr la extracción de azúcares.

### 1.9.2 Tiempo de reacción

El tiempo de reacción se puede dividir en 3 partes:

- Rampa de calentamiento: Es el tiempo que demora en alcanzar la temperatura deseada, en este tiempo se produce la mayor extracción de azúcares de la hemicelulosa.
- Tiempo de residencia: Es el tiempo en el que se mantiene la biomasa a la temperatura máxima, en este punto debido a la temperatura y acidez del medio se produce la extracción de la mayor parte de azúcares.
- Tiempo de enfriamiento: Es un fenómeno rápido que no tiene influencia en la reacción. (Barroso Casillas, 2010). (Ilustración 15).

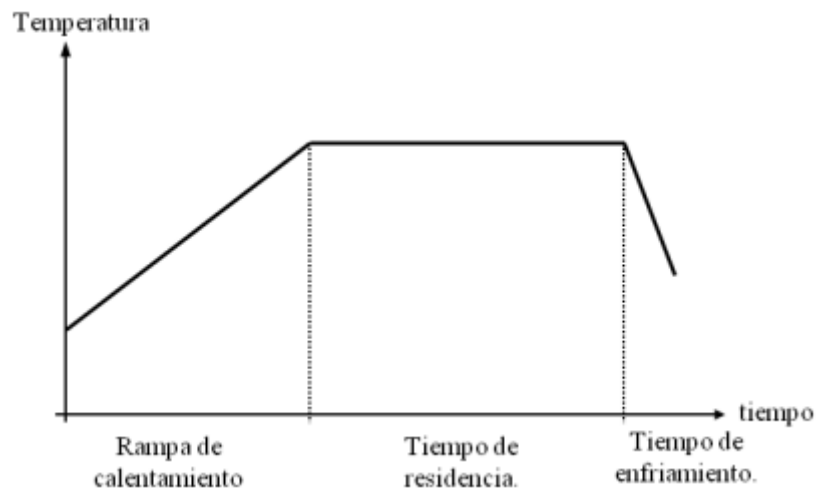


Ilustración 15: Diagrama de Temperatura vs tiempo de cocción de un proceso hidrotérmico. Fuente: (Barroso, 2010)



### 1.9.3 Concentración de ácido

Una de las variables a utilizar es la concentración de ácido, se optimizará su valor trabajando en un rango de diferentes diluciones, para alcanzar la máxima extracción de azúcares.

### 1.10 Cinética del proceso de hidrólisis

La hidrólisis de polisacáridos consta de dos reacciones simultáneas, siendo la primera la hidrólisis de hemicelulosas que controla la velocidad de disolución de polisacáridos al inicio, y la segunda, la hidrólisis de celulosa, que se produce a una velocidad distinta, controlando la fase final de reacción. (Barroso Casillas, 2010)

Por lo tanto, se distinguen dos etapas con distinta velocidad de reacción, en la que la conversión máxima posible para cada especie está determinada por las condiciones de reacción, según la expresión:

$$\frac{dCH}{dt} = -kCH$$

**En donde:**

C corresponde de la celulosa

H corresponde a la hemicelulosa

La acidez del medio tiene gran influencia en la velocidad de reacción por lo que la reacción se ve afectada por la concentración de protones, pudiendo expresarse por la ecuación.

$$K = K_0[H^+]e^{-\frac{E_a}{RT}}CH$$

En cuanto a la cinética de descomposición de la lignina esta se asimila a una ecuación diferencial de primer orden.

$$\frac{dL}{dt} = -kL$$

En donde L representa la cantidad de lignina en el material lignocelulósico. Y la constante de velocidad se calcula mediante la expresión.

$$k = k_0e^{-\frac{E_a}{RT}}$$



### 1.11 Productos de reacción

- **Azúcares:** La glucosa y la xilosa son las principales azúcares que se forma a partir de biomasa celulósica.
- **Xilooligómeros:** Tiene propiedades prebióticas lo que le da un campo de aplicación alimentaria y farmacéutica.
- **Furfural:** Es un producto valorizable que puede ser utilizado en la fabricación de pinturas, componente de resinas sintéticas, disolvente en el refinado de aceites lubricantes y ligante de emulsiones asfálticas.
- **Ácido Acético:** Grandes aplicaciones industriales a través de la formación de esteres como son el acetato de vinilo o el acetato de celulosa.

### 1.12 Condiciones favorables de la hidrólisis ácida

Con la finalidad de obtener datos que nos sirvan de base en cuanto a las condiciones más favorables para el desarrollo de la reacción de hidrólisis de la biomasa de los residuos de la planta de banano, se realiza un estudio comparativo entre los resultados obtenidos en procesos de hidrólisis con diferentes tipos de biomasa.

Se seleccionan los resultados del bagazo de la caña de azúcar, de los residuos del mango común, de la cascara de banano, de la cascarilla de cebada y de la cascara de naranja debido a que las condiciones de operación para la reacción de hidrólisis son similares a las que se plantean en este trabajo.

En la tabla 6 se muestran las condiciones óptimas de reacción de los distintos tipos de biomasa.



**Tabla 6: Condiciones óptimas de reacción de hidrólisis ácida para diferentes tipos de biomasa.**

BIOMASA	Temperatura °C	Tiempo min	% Ácido	Referencia
Bagazo de caña de azúcar	75	60	Ácido sulfúrico al 16% p/v	(Chandler , y otros, 2012)
Residuos de mango	80	60	Ácido sulfúrico 0,5% p/v	(Mejía, y otros, 2007)
Cáscara de banano	125	15	Ácido sulfúrico 5% p/p	(Monsalve , Medina, & Ruiz, 2006)
Cascarilla de cebada	110	210	Ácido sulfúrico 1% p/p	(Aguilar Rivera & Canizales Leal, 2004)
Cáscara de naranja	125	15	Ácido sulfúrico 7% v/v	(Alvear , y otros, 2009)

Fuente: Autor.

### 1.12 Tratamiento previo a la hidrólisis ácida

Se le denomina pre tratamiento al conjunto de acciones para mejorar el rendimiento en la obtención de azúcares fermentables desde la biomasa inicial. Cualquier mejora que se haga en los procesos debe reflejarse en un mayor rendimiento y economía en la obtención de Bio-combustibles. (Pereira, 2009)

Los métodos de pre tratamiento se refieren a la solubilización y separación de uno o más de los tres componentes de la biomasa (hemicelulosa, celulosa, lignina) para hacer la biomasa solida restante más accesible a un posterior tratamiento químico o biológico. Es necesario eliminar la lignina para la preservación de polisacáridos como hemicelulosa y celulosa porque de allí provienen los azúcares reductores, ya que son los mejores indicadores de la degradación y conversión del tejido vegetal a azúcares fermentables.

La eliminación de la lignina aumenta la porosidad del material vegetal, para facilitar la exposición de estos polisacáridos a la hidrólisis posterior, sea química o enzimática. La degradación de la lignina de las cáscaras de piña y naranja: sumergiendo las cáscaras en una solución de NaOH 0.1N durante 15 minutos. Posteriormente se adicionó sulfato de calcio y se dejó en reposo por 3 horas. (Hoyos & Perez, 2005). Por último, se separó el material de la solución por decantación.



## CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de la presente investigación consta de cinco partes: Identificación de las zonas de cultivo en Ecuador, muestreo de la biomasa, pre-tratamiento de la biomasa, análisis físico químico de la muestra, hidrólisis de la biomasa utilizando ácido sulfúrico diluido, cromatografía líquida de alta eficiencia.

Todos los equipos utilizados son parte del proyecto “Producción de Hidrogeno a Partir de la Biomasa Procedente de los Residuos de la Planta de Banano mediante Gasificación Catalítica en Agua a Temperatura Supercrítica”, que se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería de Reactores y Catálisis en la Universidad de Cuenca.

### 2.1. Identificación de las zonas de cultivo de banano en ecuador

La identificación de las zonas de cultivo en Ecuador, es importante en esta investigación ya que esto con lleva a un muestreo representativo de la materia prima a utilizarse.

#### 2.1.1 *Materiales*

- Mapa del Ecuador con disponibilidad de los residuos de banano. (Anexo 1)
- Registros de Producción de Banano por provincias y cantones. (Tabla N°2 y N°3)
- Registros de Haciendas bananeras y su producción. (Banana Export, 2015)

#### 2.1.2 *Método*

- Se realizó la demarcación geográfica de las zonas bananeras.
- Se seleccionó la provincia con mayor cultivo en Ecuador.
- Se seleccionó el cantón de mayor cultivo.
- Se seleccionó y se contactó a la hacienda bananera de mayor cultivó.

## 2.2 Muestreo de la biomasa

El propósito del muestreo es seleccionar la biomasa adecuada a nivel del país de manera que los resultados obtenidos de la experimentación puedan ser representativos.

La Hacienda La Clementina es una de las más grandes de Ecuador, la cual cuenta con una superficie de 12.085 hectáreas. Está ubicada en la provincia de Los Ríos, parroquia La Unión en las coordenadas 1° 40' 0" S, 80° 21' 0" W. (Ilustración 16)

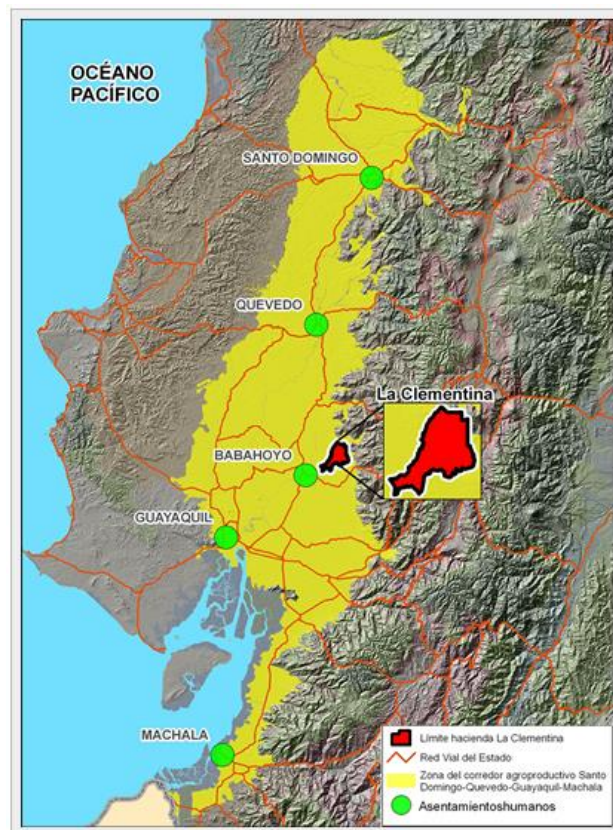


Ilustración 16: Ubicación de la Hacienda La Clementina. (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2015)

La superficie productiva del predio se encuentra dividida de la siguiente manera: 2546,67 ha de cultivo de banano, 75 ha de cultivo de limón, 180 ha de plantación de teca, 10 ha de cultivo de café, 4928 ha de pastizales. El bosque protector tiene una extensión de 2180 ha. La superficie total de producción de banano posee certificación GLOBALGAP. La hacienda pertenece a La Cooperativa de Producción y Comercialización La Clementina, Trabajadores-Propietarios "COOPROCLEM", asociación conformada por los trabajadores previos de la hacienda La Clementina.





Se seleccionó la Hacienda la Clementina ya que es una de las más grandes del país y para la toma de muestras se seleccionó un solo bloque debido a que era el que se encontraba en cosecha en el momento del muestro.

### **2.2.1 Materiales**

- Fundas plásticas (contenedores).
- Ropa Adecuada (botas, mandiles)
- Etiquetas y marcadores.
- Equipo de poda: machete.

### **2.2.2 Metodología del muestreo**

La metodología propuesta contempló los siguientes pasos (Robinson & Saúco, 2010):

- Las muestras fueron tomadas en pequeños bloques de crecimiento uniforme, haciéndose subdivisiones del terreno.
- Se tomaron 10 plantas por bloque, las mismas que estuvieron dispersas por todo el bloque.
- Las plantas se seleccionaron aleatoriamente.
- Las plantas se tomaron justo después de la cosecha del fruto.
- Se muestrearon por separado los siguientes elementos (Oliveira, Cordeiro, Evtuguin, Torres, & Silvestre, 2007): Peciolo/nervaduras, hojas, tallo floral, pseudotallo y el raquis, que se colocaron en contenedores adecuados y rotulados según procedencia y tipo.
- Las hojas fueron separadas de sus nervaduras.

No se tomaron muestras que contenían hongos, que presentaron deterioro microbiológico o daño causado por insectos.

El muestreo realizado se evidencia en las ilustraciones de la 17 a 22.



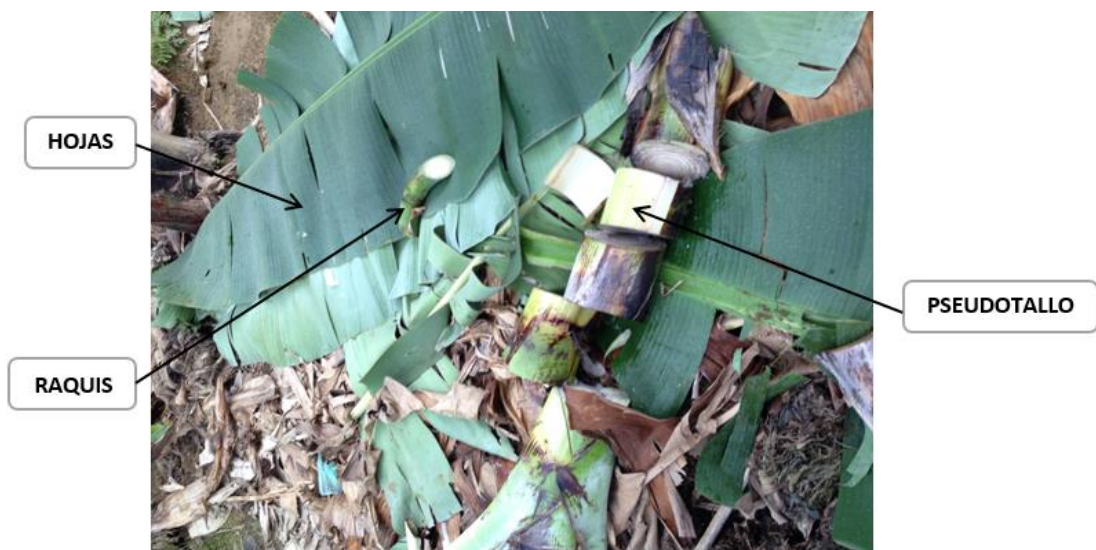
*Ilustración 17: Hacienda Clementina. Fuente: Autor*



*Ilustración 18: Investigador de la Universidad de Cuenca en el destaje del pseudotallo para la toma de muestra. Fuente: Autor.*



*Ilustración 19: Raquis y hoja de la planta de banano. Fuente: Autor.*



*Ilustración 20: Raquis, hojas y pseudotallo de la planta de banano. Fuente: Autor.*





*Ilustración 21: Racimo de banano en planta. Fuente: Autor.*



**Retoño**

*Ilustración 22: Retoño planta de banano. Fuente: Autor.*



## **2.3 Pre-tratamiento de la biomasa recolectada**

El pre-tratamiento de la biomasa tiene como principal propósito facilitar el manejo de la materia mediante su reducción de tamaño así como preservar por mayor tiempo las muestras obtenidas.

### **2.3.1 Secado de la biomasa**

Este proceso se lleva a cabo debido a que al eliminar la humedad de las muestras se logra reducir su tamaño en gran cantidad, facilitando su manejo en posteriores etapas.

Además al eliminar el agua de la biomasa esta se puede conservar por mayor debido a que se evita el crecimiento de bacterias que pueden degradar las muestras.

#### **Equipos**

- Estufa marca OVEN modelo BJPX-Summer.
- Balanza Analítica JASCO Modelo Bas 31Plus, precisión de 0,01mg.

#### **Materiales**

- Tijeras, estiletes y Cuchillas.
- Guantes.
- Bandejas de Aluminio.
- Fundas plásticas herméticas.

#### **Metodología**

- Se cortó la biomasa en segmentos de tamaño aproximado de 3\*3 cm. (Ilustración 23 y 24).
- Se colocaron los segmentos en las bandejas de aluminio de forma ordenada.
- Se llevaron las bandejas a la estufa por 24 horas a una temperatura de 105 °C. (Ilustración 25).
- Se colocó la biomasa seca en fundas plásticas herméticas debidamente etiquetadas.
- Se almacenó la biomasa en refrigeración a 4°C.



*Ilustración 23: Segmentos del pseudotallo con las dimensiones establecidas. Fuente: Autor.*



*Ilustración 24: Segmentos del raquis con las dimensiones establecidas. Fuente: Autor.*



*Ilustración 25: Muestra del pseudotallo después del secado. Fuente: Autor.*



### 2.3.2 Determinación de Humedad

Determinar la humedad es un dato importante para conocer la composición de la muestra y estimar proporciones de materia prima con la que se trabajará.

#### Equipos

- Estufa marca OVEN modelo BJPX-Summer.
- Balanza Analítica JASCO Modelo Bas 31Plus, precisión de 0,01mg.

#### Materiales

- Tijeras, estiletes y Cuchillas.
- Bandejas de Aluminio.
- Fundas plásticas herméticas.

#### Metodología

La metodología planteada se encuentra adaptada a la NORMA INEN 0173 con ciertas modificaciones que se especifican a continuación (NORMA INEN 0173, 1975):

1. Pesar la cápsula en la que se va a colocar la biomasa.
2. Pesar 5 g de muestra en la capsula e introducir en la estufa a 103°C.
3. Mantener la muestra en la estufa durante 4 o 5 horas.
4. Sacar la capsula y transferir al desecador hasta que llegue a temperatura ambiente.
5. Pesar en la balanza analítica.
6. Colocar la muestra nuevamente en la estufa durante 1 o 2 horas.
7. Repetir el procedimiento hasta obtener un peso constante, que no difiera en más de 0,1mg.
8. Cada ensayo se realiza por triplicado.

El contenido de humedad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m}$$

H= Contenido de humedad en porcentaje de masa.

m1= masa de capsula con la muestra, antes del calentamiento en g.

m2= masa de capsula con la muestra, después del calentamiento en g.

m= masa de la muestra en gramos.



### **2.3.3 Molido de la biomasa**

La función de este pre-tratamiento es reducir el tamaño de partícula con el que se trabajará en la reacción de hidrólisis facilitando de esta manera su manejo y mejorando el contacto con los reactivos a utilizar.

#### **Equipos**

- Balanza Analítica JASCO Modelo Bas 31Plus, precisión de 0,01mg.
- Molino de corte marca ALQUIMIA, modelo MC002.

#### **Materiales**

- Vasos de precipitación de 100 y 500 ml de capacidad.
- Tijeras.
- Fundas herméticas.

#### **Método**

- Pesar la cantidad inicial que se tiene de biomasa seca, registrar el peso en g como  $P_i$ .
- Cortar con las tijeras los segmentos de biomasa hasta un tamaño aproximado de 5mm, de acuerdo a lo indicado en el manual de funcionamiento del molino.
- Pesar el recipiente en el que se va a recibir el material molido y registrar su peso en g como  $P_r$ .
- Colocar el recipiente en el que se va a recibir el material molido, en la zona de descarga del molino.
- Colocar la biomasa en el cabezal de alimentación.
- Encender el molino y esperar a que termine la molienda.
- Pesar la cantidad obtenida de la molienda, junto con el recipiente y registrar su peso en g como  $P_f + P_r$ .
- Una vez que las muestras son molidas, éstas se conservan en fundas de plástico herméticas, etiquetadas y en refrigeración a 4°C.





*Ilustración 26: Biomasa después de la molienda. Fuente: Autor.*

## 2.4 Análisis físico y químico-elemental de las muestras

Este estudio fue realizado en la ciudad de Quito, en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables.

### 2.4.1 Metodología caracterización física de las muestras

Para la caracterización física de las muestras tomadas se realizó un análisis proximal, el cual se ha desarrollado bajo las siguientes normas:

- Determinación de Humedad **NORMA BS EN 14774-2:2009**
- Determinación de Cenizas **NORMA BS EN 14775:2009**
- Determinación de Volátiles **NORMA BS EN 15148:2009**
- Determinación de Carbón Fijo **NORMA ASTM D3172 – 13**

### 2.4.2 Metodología para el análisis químico-elemental de las muestras

Para la caracterización química-elemental de las muestras tomadas se utilizó un Analizador Elemental, el cual se ha desarrollado bajo las siguientes normas:

- Determinación de contenido total de Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Azufre. **NORMA BS EN 14774-2:2009**



## 2.5 Hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico diluido

Mediante este proceso se pretende la conversión de polisacáridos en azúcares solubles.

De acuerdo a la revisión bibliográfica se plantean los valores de las variables:

- Temperatura: 60°C y 93°C.
- Tiempo: 15 min, 30 min y 60 min.
- Concentración de ácido: 3%, 6% y 10%.

Que han demostrado ser los mejores rangos de trabajo para la reacción de hidrólisis de biomasa. (Tabla N°6). Para la experimentación se trabajará con una variable a la vez y con las cinco partes de la planta de banano. Dando un total de 90 experimentos.

Como un proceso previo para optimizar el número de pruebas que se realizaron en HPLC, se determinaron los sólidos totales disueltos que corresponde a los azúcares simples, dentro de los cuales se encuentra la glucosa, mediante la medida de los grados Brix. Aquellos que tuvieron el mayor porcentaje de grados Brix fueron los seleccionados.

### Equipos y Materiales

- Plancha de calentamiento con agitación magnética, marca OVAN modelo MNG02E con escalas de 25%, 50%, 75% y 100%, que representan temperaturas de 100-200-300-400 °C respectivamente.
- Balanza Analítica JASCO Modelo Bas 31Plus, precisión de 0,01mg.
- Brixómetro con escala 1-20.
- Vasos de precipitación de 100 ml.
- Termómetro con escala 0 a 100°C.
- Cronómetro.
- Embudo y papel filtro.
- Luna de reloj.
- Refrigerante.
- Corchos perforados.
- Balón de pírex de 500 ml con fondo plano.
- Probeta de 100 ml.
- Tubos de ensayo con tapas.

### Reactivos

- Ácido sulfúrico puro.
- Agua destilada.

**Método:****Preparación de solución al 3% de ácido sulfúrico:**

- Se midió en una pipeta graduada el valor de 3 ml de ácido sulfúrico puro respectivamente y aforar a 100 ml con agua destilada.
- Para preparar 1000 ml de solución se midió 30ml y se aforó con agua destilada a 1000 ml.

**Reacción de hidrólisis.**

- Se pesaron 3g de biomasa en la balanza analítica.
- Se colocaron en el balón de fondo plano 3 mg de biomasa y se añadió 60ml de la solución al 3% de ácido sulfúrico.
- Se calentó la solución a 60°C, en la plancha de calefacción durante 15 min.
- Se enfrió la muestra y se filtra a través de un embudo y papel filtro.
- El filtrado se recogió en tubos de ensayo con tapas.
- Se midieron los grados Brix utilizando el brixómetro, colocando una gota de la muestra en el prisma y se realizó la lectura.
- Se registraron los datos.
- El proceso se repitió para las diferentes combinaciones de Temperatura, tiempo y concentración que se especifican en la tabla 7.

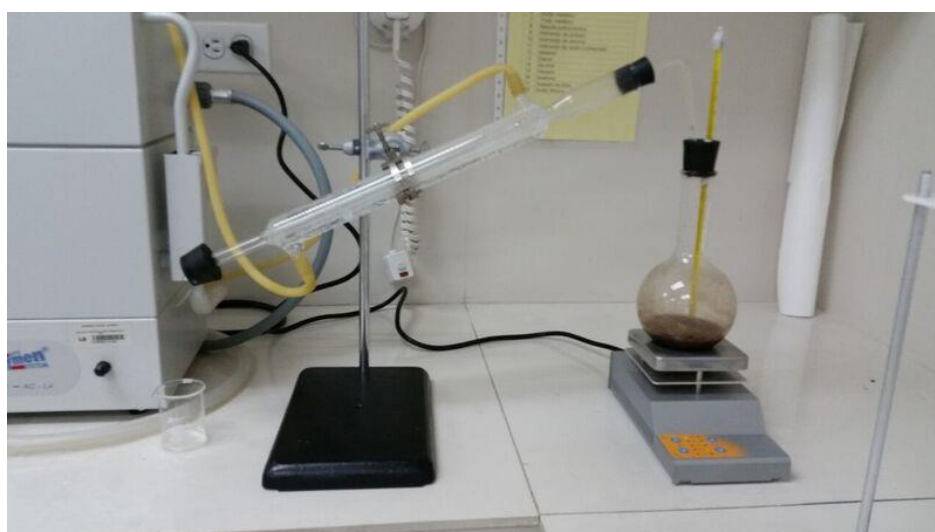
El proceso de hidrólisis realizado se muestra en las ilustraciones de la 27 a la 32



*Ilustración 27: Pesado de la biomasa para la reacción de hidrólisis. Fuente: Autor.*



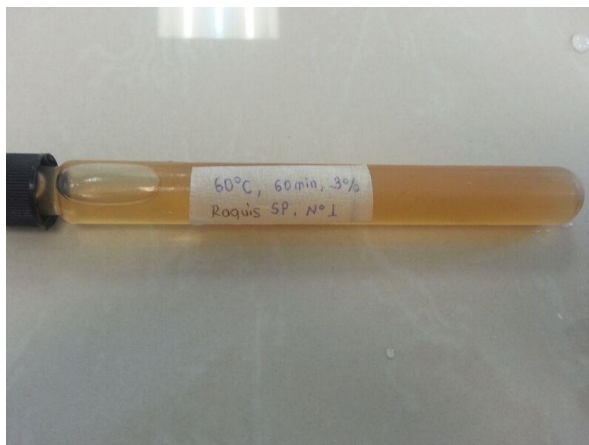
*Ilustración 28: Calentamiento de la biomasa + solución de ácido. Fuente: Autor.*



*Ilustración 29: Reacción de hidrólisis. Fuente: Autor.*



*Ilustración 30: Filtrado de la solución obtenida de la reacción de hidrólisis. Fuente: Autor.*



*Ilustración 31: Líquido final obtenido de la reacción de hidrólisis. Fuente: Autor.*



*Ilustración 32: Almacenamiento de las muestras resultantes de la hidrólisis en refrigeración a 4°C. Fuente: Autor.*

## 2.6 Cromatografía líquida de alto rendimiento

La cromatografía líquida de alto rendimiento es una de las técnicas de separación más ampliamente utilizada debido a su versatilidad y amplio campo de aplicación, mediante la cual se pretende identificar y cuantificar los diferentes componentes obtenidos en la reacción de hidrólisis.

### Equipos

- Cromatografo líquido de alta resolución JASCO LC4000, equipado con: a) Horno para columna JASCO CO4061, b) Detector IR4030 c) Detector UV/VIS 4075 d) Bomba cuaternaria PU4180 e) Inyector manual. Fase Reversa.



- Columna para azúcares Marca Nucleogel Sugar 810 Ca rellena de resina de poliestireno/divinilbenceno sulfonada en forma de calcio, con tamaño de partícula de 9µm, longitud de 300 mm -7.8 mm.
- Balanza analítica BOECO modelo BAS 31 Plus con precisión de 0,1 mg.

### **Materiales**

- Papel Filtro
- Filtros de 0.45 µm
- Tubos de ensayo de 20-50 ml
- Balón de aforo de 100 cc
- Espátula
- Lunas de reloj
- Piseta 250 ml
- Viales
- Filtros 0.45 µm
- Jeringas 5cc-50 µl
- Pipetas 2-5-10 ml

### **Reactivos**

- Glucosa grado analítico
- Fructosa grado analítico
- Manosa grado analítico
- Xilosa grado analítico
- Agua tipo I 10 L
- Agua tipo II 10 L
- NaOH químicamente puro.
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> químicamente puro.
- Metanol químicamente puro.

### **Procedimiento**

#### **Preparación de estándares de calibración externos**

Se preparan 100 ml de soluciones para los estándares indicados en la tabla N° 8

**Tabla 7: Concentración de estándares de calibración**

Concentración de estándares de calibración	
Estándar	Concentración (ppm)
Glucosa	1250-2500-5000-10000
Fructosa	1250-2500-5000-10000
Xilosa	1250-2500-5000-10000
Manosa	1250-2500-5000-10000

### Preparación de la muestra

La solución se neutraliza y se filtra por una membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ . No se realizaron diluciones. Se realizó la corrida de blancos que contenían ácido sulfúrico en concentraciones de 3%, 6% y 10%, que fueron previamente sometidos a calentamiento a 93°C y 15 min. Simulando las condiciones de la reacción de hidrólisis.

### Condiciones para la operación de HPLC

**Tabla 8: Condiciones para la operación de HPLC de las muestras de hidrólisis. Fuente: Autor.**

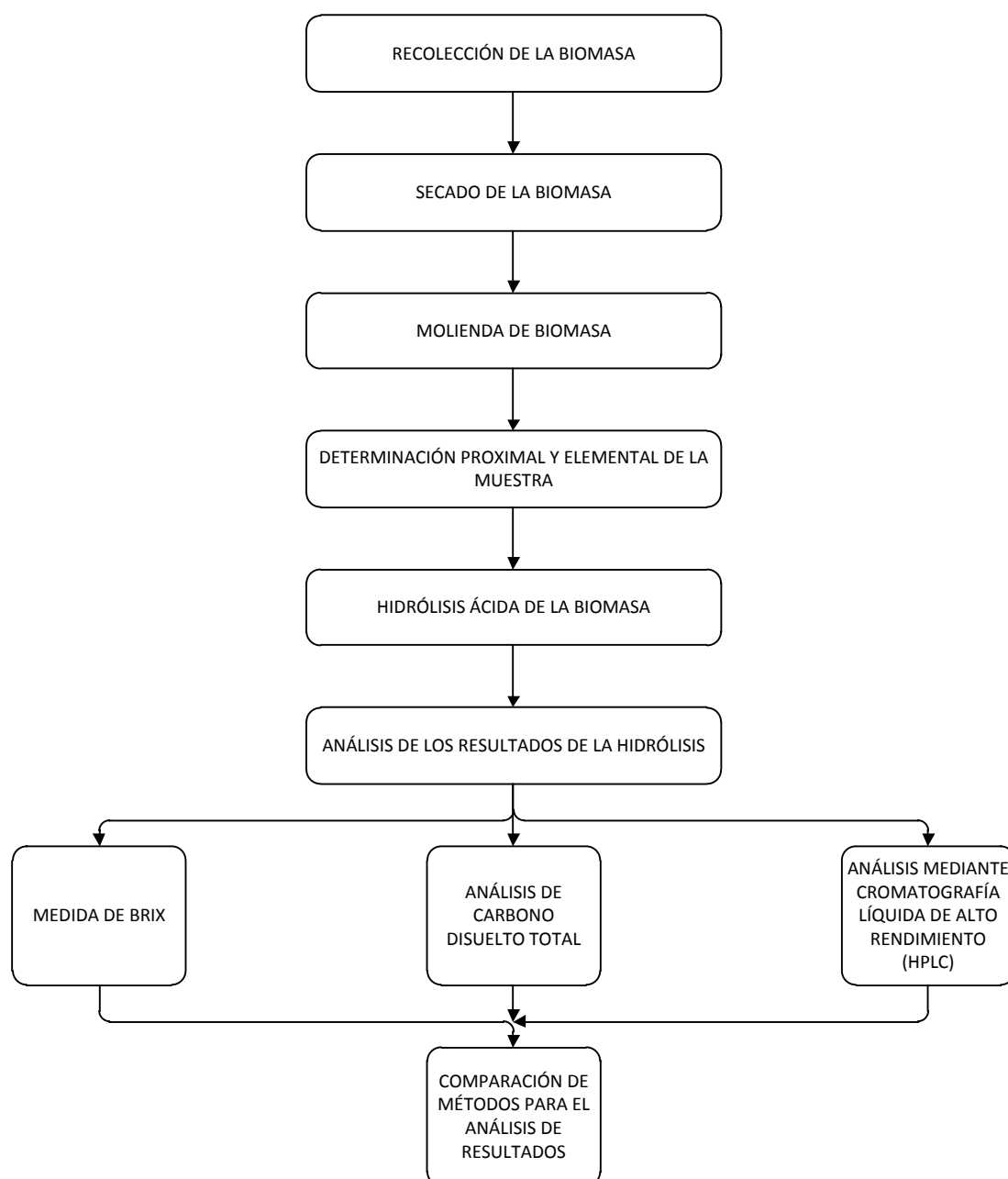
Condiciones HPLC	
Columna	300/7.8 Nucleogel sugar 810 Ca
Fase móvil	Agua/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.1 % V/V
Flujo	0.9 ml/min
Presión	Max 25Mpa (2.6-3.2MPa promedio)
Temperatura	85 °C
Tiempo de corrida	35 min
Detección	Índice de refracción
Volumen de inyección (muestra)	35 $\mu\text{l}$
Modo de elución	Isocrático

### Análisis de resultados

La caracterización y cuantificación de los azúcares presentes en las muestras fue posible por la comparación de los tiempos de retención y áreas de los picos de las muestras y los tiempos de retención y los picos de las soluciones patrón. Los resultados se expresan como ppm.

### CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la investigación serán presentados de acuerdo al flujograma de proceso:



*Ilustración 33: Diagrama del proceso de optimización de la reacción de hidrólisis. Fuente: Autor.*



### 3.1 Recolección de la biomasa

Durante el proceso de recolección de la biomasa en la Hacienda La Clementina, se pudo recabar información importante en la investigación, que se detalla a continuación:

- Después de la cosecha del racimo, el pseudotallo de la planta de la especie Cavendish es cortado a una altura de 2,50m sobre el suelo aproximadamente, mismo que aportará con nutrientes para su retoño, así como servirá de material para el condoneo (técnica originaria de la hacienda en la cual se toma la vaina foliar más externa y se la coloca a manera de estuche sobre el retoño).
- Para el cultivo, se separan las plantas a una distancia horizontal y vertical de 2,42m.
- Aproximadamente se tienen 1500 plantas por hectárea.
- Se presencia un gran desperdicio de raquis y rechazos.
- Se usan fertilizante a base de potasio y nitrógeno, por ejemplo sulfato de amonio y muriato de potasio.
- Los suelos son una combinación entre limosos y franco-arcillosos.
- Para bajar la acidez de los suelos se usa silicato de calcio o bicarbonato de calcio cada mes.
- Se dan fumigaciones aéreas semanalmente para combatir la cigatoka negra.

### 3.2 Secado de la biomasa

Mediante el desarrollo de este proceso, un dato importante que se puede recabar, es la humedad que contiene cada parte de los residuos de la planta de banano, esta información se detalla en la tabla N° 8, pudiendo observarse que el centro del pseudotallo y el raquis son las partes que presentan mayor contenido de humedad.

**Tabla 9: Humedad de las diferentes partes de la planta de banano.**

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE LA PLANTA DE BANANO		
MUESTRA	HUMEDAD %	DESV. EST
RAQUIS	93,56	0,01
HOJAS	84,12	0,01
NERVADURAS	75,23	0,01
PSEUDOTALLO	89,24	0,06
CENTRO PSEUDOTALLO	94,47	0,07

### 3.3 Molienda de la biomasa

Durante el proceso de molienda de las muestras recolectadas, existieron pérdidas en cuanto a la biomasa, pudiendo observarse en la tabla N° 9, que la pérdida de material se da mayormente en la molienda de raquis, por motivos de dureza del material que causa atascamientos, la forma de partícula del material molido depende de la forma de su materia prima.

**Tabla 10: Porcentajes de material perdido en el proceso de molienda.**

MUESTRA	% Material Perdido
Raquis	15,86
Hojas	0,41
Pseudotallo	0,99
Pseudotallo central	1,23
Nervaduras	0,78

### 3.4 Resultados del análisis proximal y elemental de la muestra seca

**Tabla 11: Análisis proximal y elemental de los residuos de la planta de banano.**

ANÁLISIS PROXIMAL DE LOS RESIDUOS DE LA PLANTA DE BANANO				
Muestra	% Cenizas	% Volátiles	% Humedad	% Carbono Fijo
Raquis	21,22	66,38	2,95	9,45
Pseudotallo	13,69	28,03	4,52	53,77
Centro Pseudotallo	18,66	31,12	2,57	47,75
Hojas	12,82	29,23	2,03	55,92
Nervaduras	10,34	26,47	8,11	55,08
ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS RESIDUOS DE LA PLANTA DE BANANO				
Muestra	% Carbono	% Hidrógeno	% Nitrógeno	% Azufre
Raquis	36,63	5,1	0,64	0,75
Pseudotallo	38,3	4,7	0,03	0,84
Centro Pseudotallo	38,18	3,88	0,28	0,58
Hojas	44,98	4,26	2,2	0,64
Nervaduras	43,4	3,84	0,53	0,57

Analizando las características físico-químicas de las muestras de las diferentes partes de la planta de banano, mediante la tabla N° 10 podemos determinar que:

- El raquis representa la parte de la planta de banano con mayor cantidad de volátiles, mayor contenido de cenizas y menor cantidad de carbono fijo.



- En el caso del pseudotallo, centro del pseudotallo, hojas y nervaduras podemos observar que tienen valores similares es cuanto a carbono fijo y contenido de volátiles.
- En cuanto al análisis elemental, las muestras presentan bajos contenidos de azufre, que es una ventaja en la conservación del medio ambiente, el mayor contenido de carbono lo presentan las hojas y las nervaduras con valores de 44,98% y 43,4% respectivamente, la muestra que presenta mayor cantidad de hidrógeno es el raquis con un 5,1% y el contenido de nitrógeno es superior para las hojas con un valor de 2,2%.

Mediante este estudio se puede observar de manera general el potencial energético de los residuos de la planta de banano. Cada análisis fue realizado por triplicado, como indican las normas respectivas, detalladas en el literal 2.4.

### 3.4 Resultados del proceso de hidrólisis

#### 3.4.1 *Resultados obtenidos de la reacción de hidrólisis mediante medición de grados Brix*

Una vez realizada la reacción de hidrólisis, se midieron los grados Brix de las soluciones resultantes, como medida de referencia para cuantificar la cantidad de azúcar extraída. Los resultados de la reacción, combinando las variables de tiempo, temperatura y concentración de ácido se muestran a continuación:

- **Hidrólisis sin calentamiento, con una concentración de ácido sulfúrico al 3% v/v y tiempo de reacción de 15 min**

Con estas condiciones se obtuvieron 5° Brix, en todos los casos y para todas las partes de la planta de banano. (Anexo 2).

- **Hidrólisis a Temperatura de 60 °C, con una concentración de ácido sulfúrico al 3% v/v y tiempo de 15 min**

En este caso los resultados son los mismos que para la reacción sin calentamiento, de igual manera al aumentar el tiempo de reacción de 15 min a 30 min y a 60 min, no existen cambios en los resultados (Anexo 3). Por lo que para los siguientes experimentos se fijó la temperatura en 93°C, que es la máxima que alcanza el equipo.



- **Hidrólisis a Temperatura de 93 °C, con concentración de ácido sulfúrico al 3% v/v y tiempo de 15 min**

Mediante la tabla 11 se puede observar que ya existe un incremento de 0,5°Brix tanto para el raquis, hojas, nervaduras, pseudotallo y un aumento de 1°B para el centro del pseudotallo. Por lo que para posteriores reacciones se fija la temperatura en 93°C y se aumenta la concentración de ácido.

Tabla 12: Resultados reacción de hidrólisis al 3% v/v de ácido sulfúrico y temperatura de 93°C.

Sustrato	Temperatura	Concentración ácido v/v	Tiempo	Grados Brix	
				Rep. 1	Rep. 2
Raquis	93°C	3%	15 min	5,5 °B	5,5 °B
Hojas	93°C	3%	15 min	5,5 °B	5,5 °B
Nervaduras	93°C	3%	15 min	5,5 °B	5,5 °B
Pseudotallo	93°C	3%	15 min	5,5 °B	5,5 °B
Centro Pseudotallo	93°C	3%	15 min	6 °B	6 °B

- **Hidrólisis a Temperatura de 93 °C, con una concentración de ácido sulfúrico al 6% v/v y tiempo de 15 y 30 min**

Podemos observar en la tabla 12 que existe un aumento en los grados Brix al aumentar la concentración de ácido, sin embargo al aumentar el tiempo de reacción de 15 a 30 min, disminuyen los grados Brix para el caso de las hojas, el pseudotallo y las nervaduras, mediante revisión bibliográfica se asume que esta disminución se debe a la degradación de los azúcares producidos en la reacción y a la formación de subproductos, por lo que para posteriores experimentos se fija el tiempo de reacción en 15min.

Tabla 13: Resultados reacción de hidrólisis al 6% v/v de ácido sulfúrico y 93°C.

Sustrato	Temperatura	Concentración ácido v/v	Tiempo	Grados Brix	
				Rep. 1	Rep. 2
Raquis	93°C	6%	15 min	5,5°B	5,5°B
Raquis	93°C	6%	30 min	5,5°B	5,5°B
Hojas	93°C	6%	15 min	6,5°B	6,5°B
Hojas	93°C	6%	30 min	6°B	6°B
Nervaduras	93°C	6%	15 min	6,5 °B	6,5 °B
Nervaduras	93°C	6%	30 min	6 °B	6 °B
Pseudotallo	93°C	6%	15 min	8°B	8°B
Pseudotallo	93°C	6%	30 min	7°B	7°B
C. Pseudotallo	93°C	6%	15 min	8,5°B	8,5°B
C. Pseudotallo	93°C	6%	30 min	8°B	7,5°B



- **Reacción de hidrólisis de los residuos de la planta de banano con una temperatura de 93°C, concentración de ácido de 10% v/v y tiempo de 15 min**

En este caso mediante la tabla 13 podemos observar que la extracción de azúcares es mayor que para la concentración de 6%, duplicando en la mayoría de los casos los resultados.

Al trabajar con ácidos diluidos, el aumentar la concentración de ácido a valores mayores al 10% no resulta favorable, debido a que económicamente la reacción no sería rentable, se estaría afectando mayormente al medio ambiente y concentraciones superiores afectarían al siguiente paso de este proceso que es la etapa de gasificación para la obtención de hidrógeno.

Tabla 14: Resultados de la reacción de hidrólisis al 10% v/v de ácido sulfúrico y 93°C.

Sustrato	Temperatura	Concentración ácido v/v	Tiempo	Grados Brix	
				Rep. 1	Rep. 2
Raquis	93°C	10%	15 min	12°B	12°B
Hojas	93°C	10%	15 min	13 °B	12,5°B
Nervaduras	93°C	10%	15 min	12 °B	12 °B
Pseudotallo	93°C	10%	15 min	13°B	13°B
C. Pseudotallo	93°C	10%	15 min	14°B	14°B

Se seleccionaron los mejores resultados obtenidos mediante la lectura de grados Brix, para su posterior análisis mediante DOC y HPLC. Las muestras seleccionadas fueron las correspondientes a las tablas 11, 12 y 13 con tiempos de reacción de 15min.

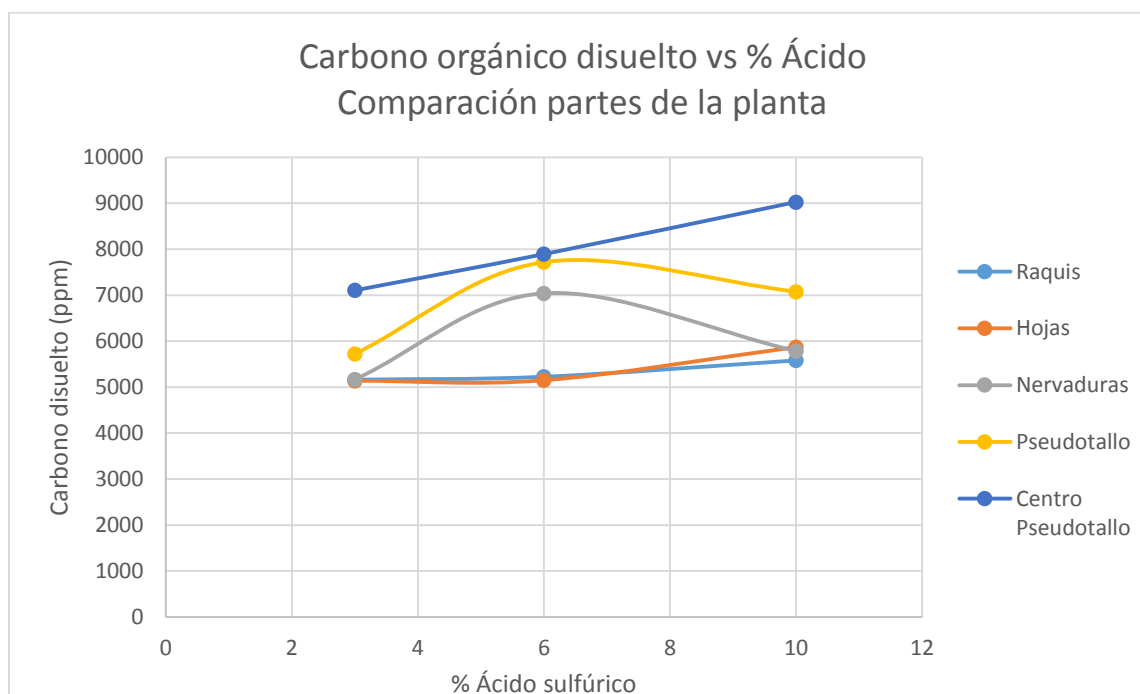
### **3.4.2 Resultados obtenidos de carbono orgánico disuelto para las soluciones resultantes de la reacción de hidrólisis**

Una vez seleccionadas las muestras más representativas del proceso de hidrólisis, se realizaron estudios para determinar el carbono orgánico disuelto en las mismas, aplicando un análisis DOC mediante el equipo vario TOC cube, los resultados se muestran en la tabla N° 14:

Tabla 15: Contenido de carbono orgánico disuelto en los líquidos obtenidos de la hidrólisis.

Muestra	Temperatura °C	Tiempo (min)	% Concentración de ácido (v/v)	desviación estándar	promedio (ppm)
Raquis	93°C	15	3	122,514	<b>5161,828</b>
Hojas	93°C	15	3	16,041	<b>5139,828</b>
Nervaduras	93°C	15	3	36,101	<b>5168,733</b>
Pseudotallo	93°C	15	3	3,807	<b>5724,666</b>
Centro Pseudotallo	93°C	15	3	73,360	<b>7106,139</b>
Raquis	93°C	15	6	16,708	<b>5226,250</b>
Hojas	93°C	15	6	20,219	<b>5340,710</b>
Nervaduras	93°C	15	6	98,239096	<b>7712,228</b>
Pseudotallo	93°C	15	6	39,498861	<b>7719,428</b>
Centro Pseudotallo	93°C	15	6	31,621090	<b>7894,266</b>
Raquis	93°C	15	10	25,191	<b>5581,349</b>
Hojas	93°C	15	10	17,161	<b>5870,809</b>
Nervaduras	93°C	15	10	112,958	<b>5786,628</b>
Pseudotallo	93°C	15	10	142,069	<b>7077,842</b>
Centro Pseudotallo	93°C	15	10	180,224	<b>9027,299</b>

Gráficamente podemos observar el comportamiento de las muestras frente a los cambios de concentración de ácido:



Gráfica 2: Comportamiento las diferentes partes de los residuos de la planta de banano frente al cambio de concentración de ácido sulfúrico.



Se puede observar en el gráfico N° 2 que para el raquis de la planta de banano, al aumentar la concentración de ácido aumenta la cantidad de carbono disuelto en 64,422ppm, cambiando la concentración de ácido de 3 al 6%, y aumentando el ácido de 3% al 10% el carbono aumenta en 419,521ppm.

En el caso de las hojas también existe un aumento en cuanto a la concentración de carbono orgánico disuelto conforme aumenta la concentración de ácido, al aumentar el porcentaje de ácido del 3% al 6% se consigue un incremento de 200,582ppm y del 3% al 10% el incremento es de 720,981 ppm.

Para las nervaduras podemos observar que al aumentar el ácido del 3% al 6% existe aumento de la cantidad de carbono en 1872,867 ppm, sin embargo al aumentar el % de ácido a 10% se observa que ya existe una disminución de carbono de 1255,272 ppm. Mediante revisión bibliográfica se puede asumir que dicha disminución se debe a la degradación de azúcares formando subproductos, ya que los monosacáridos no son estables y pueden evolucionar hasta productos de degradación, esta reacción se ve potenciada por la alta concentración de ácidos. (Barroso Casillas, 2010).

El pseudotallo repite el caso de las nervaduras, que al aumentar el ácido del 3% al 6% existe aumento de la cantidad de carbono en este caso en 1994,762 ppm, sin embargo al aumentar el % de ácido a 10% se observa que ya existe una disminución de carbono de 641,586 ppm.

El centro del Pseudotallo presenta aumento de carbono disuelto conforme aumenta el % de ácido sulfúrico, del 3 al 6% aumenta 788,127, y del 3 al 10% aumenta 1921,16 ppm.

Comparando los resultados obtenidos de todas las partes de la planta, se puede observar que el raquis y las hojas son las que presentan menor cantidad de carbono orgánico disuelto, mientras que el centro del pseudotallo presenta la mayor cantidad.

Con estos datos podemos obtener una idea general acerca de las partes de los residuos de la planta de banano que contienen mayor cantidad de carbono, el mismo que podría ser parte de los azúcares que se obtienen del proceso de hidrólisis, datos que serán verificados mediante análisis HPLC.

### 3.4.3 Resultados obtenidos mediante HPLC para las soluciones resultantes de la reacción de hidrólisis de las diferentes partes de la planta de banano

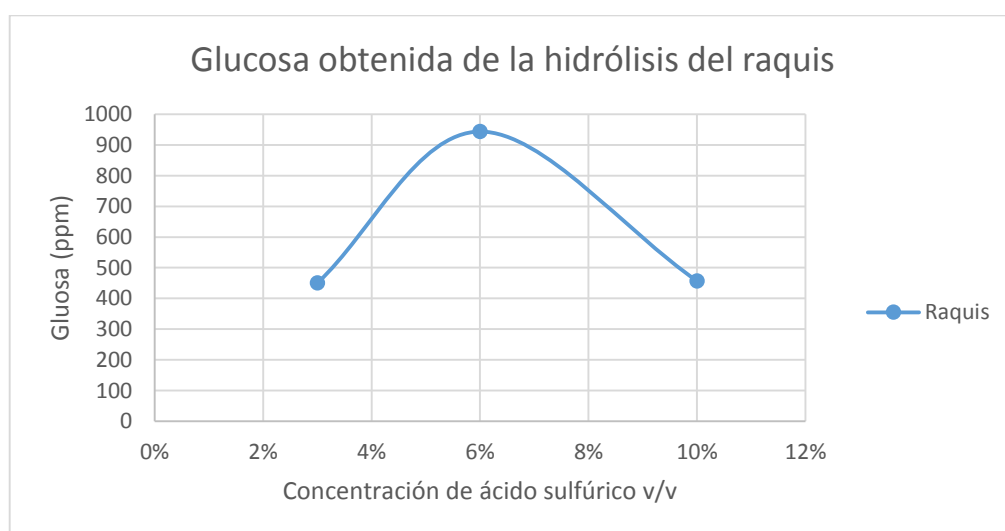
La tabla N° 15 muestra los resultados del análisis HPLC, de la hidrólisis del raquis a las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico. Los cromatogramas se muestran en el Anexo 4.

Tabla 16: Resultados del HPLC para el raquis con las diferentes concentraciones de ácido.

Resultados obtenidos raquis 3%, 93°C, 15min			
Nombre Pico	Área %	Tiempo de retención (min)	Cantidad (mg/l)
Glucosa	21,61	12,53	450,04
Fructosa	33,14	16,12	835,50
Resultados obtenidos raquis 6%, 93°C, 15min			
Glucosa	14,49	12,47	943,36
Manosa	1,69	14,12	317,01
Fructosa	19,53	15,88	1446,49
Resultados obtenidos raquis 10%, 93°C, 15min			
Glucosa	7,571	12,33	456,92
Xilosa	12,774	13,57	882,01
Fructosa	11,490	15,73	838,57

Mediante estos resultados, se puede establecer que el tiempo de retención de la glucosa, que es el compuesto a optimizar, tiene un valor medio de 12,44 min. Se presentan también otros azúcares como son fructosa y xilosa en mayor cantidad que la glucosa y manosa en menor cantidad.

Comparando los datos en las diferentes concentraciones tenemos:



Gráfica 3: Comparación de los resultados de la hidrólisis del raquis con diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.



Se puede observar en la gráfica 3 que para el caso del raquis la mayor extracción de glucosa se obtiene realizando la hidrólisis con una concentración de ácido sulfúrico al 6%. Al utilizar una concentración del 10% la cantidad extraída es menor.

En la tabla 16 se muestran los resultados para las hojas de planta de banano. Sus cromatogramas se muestran en el anexo 5.

**Tabla 17: Resultados del HPLC para las hojas con las diferentes concentraciones de ácido.**

<b>Resultados obtenidos de hojas 3%, 93°C, 15min</b>			
<b>Nombre Pico</b>	<b>Área %</b>	<b>Tiempo de retención (min)</b>	<b>Cantidad (mg/l)</b>
<b>Glucosa</b>	18,06	12,55	282,24
<b>Fructosa</b>	69,35	15,78	1307,26
<b>Resultados obtenidos hojas 6%, 93°C, 15min</b>			
<b>Fructosa</b>	17,20	15,84	142,38
<b>Resultados obtenidos hojas 10%, 93°C, 15min</b>			
<b>Glucosa</b>	2,829	12,46	526,06
<b>Xilosa</b>	4,436	13,51	972,22
<b>Fructosa</b>	6,537	15,67	1410,15

Existe formación de glucosa utilizando concentraciones de ácido al 3 y 10%. Se observa además presencia de xilosa y fructosa. La mayor cantidad de glucosa se obtiene utilizando una concentración de ácido de 10%. Aumentando en 243,82 ppm, al aumentar la concentración del 3 al 10%.

Los resultados para las nervaduras se detallan en la tabla N° 17. Sus cromatogramas se presentan en el anexo 6.

**Tabla 18: Resultados del HPLC para las nervaduras con las diferentes concentraciones de ácido.**

<b>Resultados obtenidos de nervaduras 3%, 93°C, 15min</b>			
<b>Nombre Pico</b>	<b>Área %</b>	<b>Tiempo de retención (min)</b>	<b>Cantidad (mg/l)</b>
<b>Fructosa</b>	25,66	15,94	<b>774,94</b>
<b>Resultados obtenidos nervaduras 6%, 93°C, 15min</b>			
<b>Glucosa</b>	29,723	12,483	1607,36
<b>Xilosa</b>	19,03	13,733	1294,17
<b>Fructosa</b>	39,09	15,850	2337,17
<b>Resultados obtenidos nervaduras 10%, 93°C, 15min</b>			
<b>Glucosa</b>	22,21	12,33	702,14
<b>Xilosa</b>	34,94	13,57	1464,41
<b>Fructosa</b>	26,53	15,77	984,77

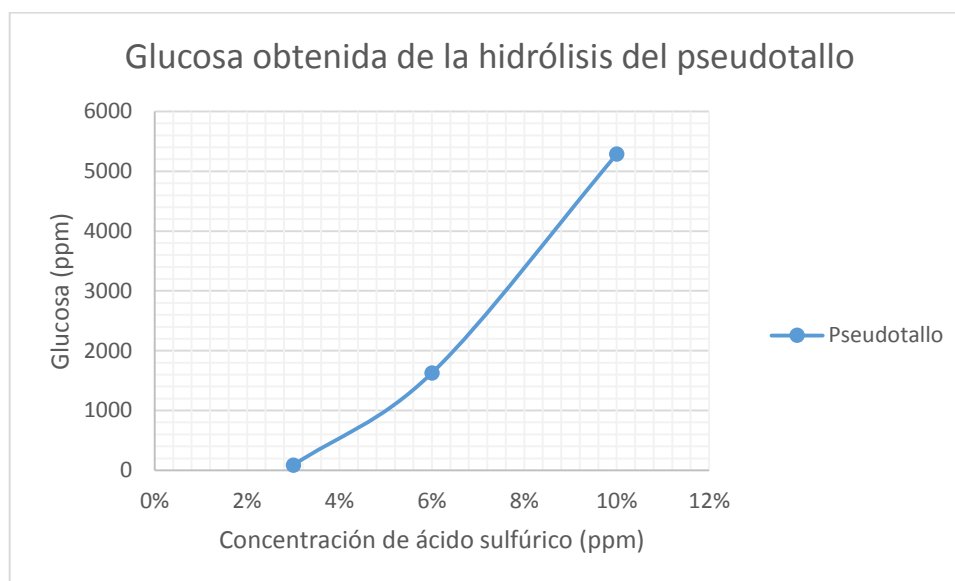
Para el caso de las nervaduras no existe formación de glucosa utilizando una concentración de ácido sulfúrico al 3%. Y su mayor extracción se da con una concentración de ácido al 6%, superando con 905,22 ppm a la cantidad obtenido con una concentración del 10%.

Los resultados para el pseudotallo se presentan en la tabla 18 y sus cromatogramas en el anexo 7.

**Tabla 19: Resultados del HPLC para el pseudotallo con las diferentes concentraciones de ácido.**

Resultados obtenidos de pseudotallo 3%, 93°C, 15min			
Nombre Pico	Área %	Tiempo de retención (min)	Cantidad (mg/l)
Glucosa	59,88	12,44	86,1525
Resultados obtenidos pseudotallo 6%, 93°C, 15min			
Glucosa	6,99	12,33	<b>1626,92</b>
Resultados obtenidos pseudotallo 10%, 93°C, 15min			
Glucosa	52,33	12,53	5285,99
Xilosa	9,74	13,75	877,46
Fructosa	17,95	15,65	885,17

Existe formación de glucosa utilizando las 3 concentraciones de ácido. Con concentraciones de 3 y 6 % se observa únicamente la presencia de glucosa, mientras que con 10% de ácido sulfúrico existe también xilosa y fructosa, con concentraciones menores.



*Gráfica 4: Comparación de los resultados de la hidrólisis del pseudotallo con diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.*

Mediante la gráfica 4 podemos observar que la extracción de glucosa para el pseudotallo es mayor conforme aumenta la concentración de ácido sulfúrico. Si se incrementa la concentración de 6 a 10%, el valor de la glucosa extraída aumenta 3659,07 ppm.

Los resultados para el centro del pseudotallo se muestran en la tabla N° 19 y sus respectivos cromatogramas en el anexo 8.

**Tabla 20: Resultados del HPLC para el centro del pseudotallo con las diferentes concentraciones de ácido.**

<b>Resultados obtenidos del centro del pseudotallo 3%, 93°C, 15min</b>			
<b>Nombre Pico</b>	<b>Área %</b>	<b>Tiempo de retención (min)</b>	<b>Cantidad (mg/l)</b>
Glucosa	0,96	12,48	429,75
Manosa	0,611	14,15	446,96
Fructosa	4,24	15,87	2189,55
<b>Resultados obtenidos centro pseudotallo 6%, 93°C, 15min</b>			
Glucosa	40,03	12,55	4356,29
Fructosa	30,50	13,87	3499,89
<b>Resultados obtenidos centro pseudotallo 10%, 93°C, 15min</b>			
Manosa	4,66	13,95	5839,68
Fructosa	7,28	16,07	1407,65

Existe presencia de glucosa utilizando concentraciones de ácido sulfúrico de 3 y 6 % aumentando en 3926,54 ppm, cuando se incrementa la concentración de ácido de 3 a 6%. Se puede observar además la presencia de otros azúcares como son fructosa y manosa.

Calculando el rendimiento en cuanto a glucosa obtenida por gramos de biomasa tenemos:

**Tabla 21: Resultados del rendimiento a glucosa a partir de los gramos de biomasa.**

<b>Muestra</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Concentración ácido (%v/v)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Glucosa (ppm)</b>	<b>Rendimiento (%g glucosa/g biomasa)</b>
Raquis	93°C	3%	15	450,04	0,90
Hojas	93°C	3%	15	282,24	0,56
Nervaduras	93°C	3%	15	0	0
Pseudotallo	93°C	3%	15	86,15	0,17
C. Pseudotallo	93°C	3%	15	429,75	0,85
Raquis	93°C	6%	15	943,36	1,89
Hojas	93°C	6%	15	0	0
Nervaduras	93°C	6%	15	1607,36	3,21
Pseudotallo	93°C	6%	15	1626,92	3,25
C. Pseudotallo	93°C	6%	15	4356,29	8,71
Raquis	93°C	10%	15	456,92	0,91
Hojas	93°C	10%	15	526,06	1,05
Nervaduras	93°C	10%	15	702,14	1,40
Pseudotallo	93°C	10%	15	5285,99	10,57
C. Pseudotallo	93°C	10%	15	0	0



Según los resultados expuestos en la tabla N° 20 se observa que trabajando con una concentración de ácido de 3%, el mayor rendimiento a glucosa se da para el raquis con una porcentaje de 0,90%.

Para una concentración de ácido del 6% el mayor rendimiento a glucosa es para el centro del pseudotallo, obteniendo un rendimiento de 8,71%.

Para el caso de utilizar una concentración del 10% el mayor rendimiento es para el pseudotallo con un valor de 10,57%

De manera general se observa que los mejores resultados en cuanto a glucosa son para el pseudotallo al 10% y para el centro del pseudotallo al 6%.

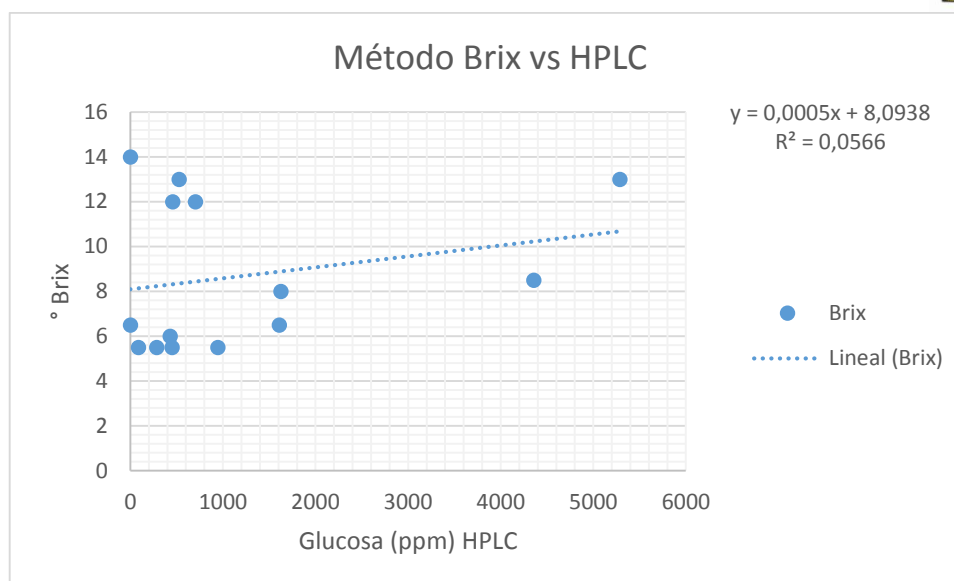
### 3.5 Análisis comparativo de los resultados obtenidos con los distintos métodos de lectura

En la tabla N° 21 se comparan los resultados obtenidos mediante las diferentes medidas utilizadas como referencia para el análisis de azúcares obtenidos en la hidrólisis:

**Tabla 22: Tabla resumen de grados Brix, DOC y HPLC de las diferentes muestras obtenidas de la reacción de hidrólisis.**

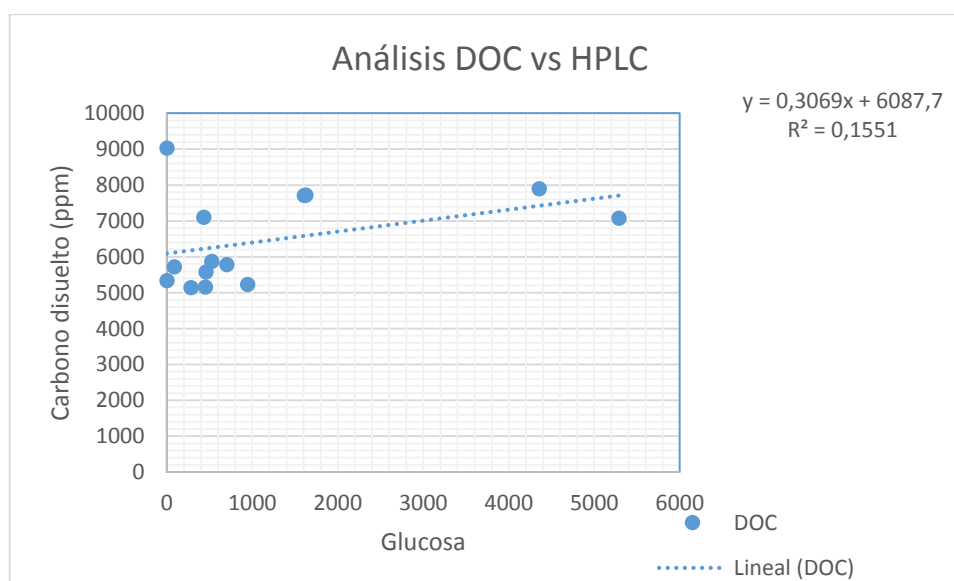
Muestra	% Ácido v/v	Brix	DOC (ppm)	HPLC Azúcares totales (ppm)	Glucosa (ppm)
Raquis	3	5,5°B	5161,828	1285,53	450,039
Hojas	3	5,5°B	5139,828	1589,49	282,236
Nervaduras	3	5,5°B	5168,733	774,943	0
Pseudotallo	3	5,5°B	5724,666	86,1525	86,1525
C. Pseudotallo	3	6°B	7106,139	3066,24	429,747
Raquis	6	5,5°B	5226,250	2706,86	943,360
Hojas	6	6,5°B	5340,710	142,376	0
Nervaduras	6	6,5°B	7712,228	5238,7	1607,36
Pseudotallo	6	8 °B	7719,428	1626,92	1626,92
C. Pseudotallo	6	8,5°B	7894,266	7852,18	4356,29
Raquis	10	12°B	5581,349	2177,5	456,921
Hojas	10	13 °B	5870,809	2908,425	526,055
Nervaduras	10	12 °B	5786,628	3151,315	702,135
Pseudotallo	10	13°B	7077,842	7048,62	5285,99
C. Pseudotallo	10	14°B	9027,299	7247,33	0

Comparando de manera gráfica los resultados obtenidos por los diferentes métodos tenemos:



Gráfica 5: Comparación de método Brix con HPLC

Se puede observar en el gráfico N° 5, correspondiente a la medida de grados Brix para determinar glucosa, que el índice  $R^2$  es de 0,05 indicando que no existe relación entre estas medidas.



Gráfica 6: Comparación análisis DOC con HPLC.

En el caso del análisis DOC para determinar glucosa, la gráfica 6 nos muestra que no existe relación entre este método y la cantidad del componente deseado. Obteniendo un valor de  $R^2$  de 0,16.



## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Se pudo determinar mediante la investigación realizada que las condiciones de mayor obtención de glucosa mediante hidrólisis dentro de los rangos en los que se realizó la experimentación son de:

- Temperatura: 93 °C.
- Tiempo: 15 min.
- Concentración de ácido sulfúrico: 10%
- Parte de la planta de banano: Pseudotallo.

Al realizar la recolección de los residuos de la planta de banano y dar a conocer los objetivos del proyecto, se estableció que al aprovechar esta biomasa se solucionaría el gran problema de manejo de desechos que indican tener las haciendas productoras de banano, pudiendo generar una fuente de ingresos para las mismas, razón por la cual el proyecto tiene gran acogida por parte de los productores bananeros.

En cuanto a los métodos utilizados para la determinación de la cantidad de glucosa obtenida en la hidrólisis se pudo determinar que la medida de los grados Brix y el análisis DOC de las soluciones obtenidas de la hidrólisis no es un valor de referencia útil para la selección de muestras.

La medida exacta para determinar las cantidades obtenidas es mediante cromatografía líquida (HPLC) ya que brinda un análisis tanto cualitativo como cuantitativo de los diferentes tipos de azúcares presentes con sus cantidades exactas.

Se realizó un pre-tratamiento de la muestra para la eliminación de lignina de la biomasa, sin embargo este proceso no fue favorable en este caso ya que existió disminución en cuanto a los sólidos disueltos obtenidos.

Los resultados obtenidos en esta investigación serán utilizados en el "Proyecto Producción de Hidrogeno a Partir de la Biomasa Procedente de los Residuos de la Planta de Banano mediante Gasificación Catalítica en Agua a Temperatura Supercrítica" para mediante la glucosa obtenida en el proceso de hidrólisis, mediante un proceso de gasificación, convertir la glucosa en hidrógeno.



## 4.2 Recomendaciones

Los valores obtenidos en cuanto al rendimiento de glucosa son valores bajos, por lo que se recomienda para posteriores investigaciones trabajar con temperaturas superiores a  $240^{\circ}\text{C}$ , siendo lo más efectivo el trabajo a temperaturas supercríticas, sin embargo, son poco usadas debido a sus costos.

En cuanto a la materia prima, esta contiene gran cantidad de humedad, superiores al 80%, por lo que se recomendaría un secado a la intemperie previo a su traslado.

Se recomienda también realizar un estudio económico para determinar la rentabilidad de la investigación.

[illegible]

	1
	2
	3
	4

**Fuente:** (Instituto Nacional de Preinversión, 2014)



## ANEXO 2

### RESULTADOS DE HIDRÓLISIS SIN CALENTAMIENTO

Sustrato	Concentración ácido v/v	Tiempo	Grados Brix	
			Rep. 1	Rep. 2
Raquis	3%	15 min	5°B	5°B
Hojas	3%	15 min	5 °B	5°B
Nervaduras	3%	15 min	5 °B	5 °B
Pseudotallo	3%	15 min	5°B	5°B
C. Pseudotallo	3%	15 min	5°B	5°B

*Anexo 2: Tabla de resultados reacción de hidrólisis sin calentamiento.*

**Fuente: Autor.**

## ANEXO 3

## RESULTADOS DE HIDRÓLISIS A 60 °C Y DIFERENTES TIEMPOS DE REACCIÓN

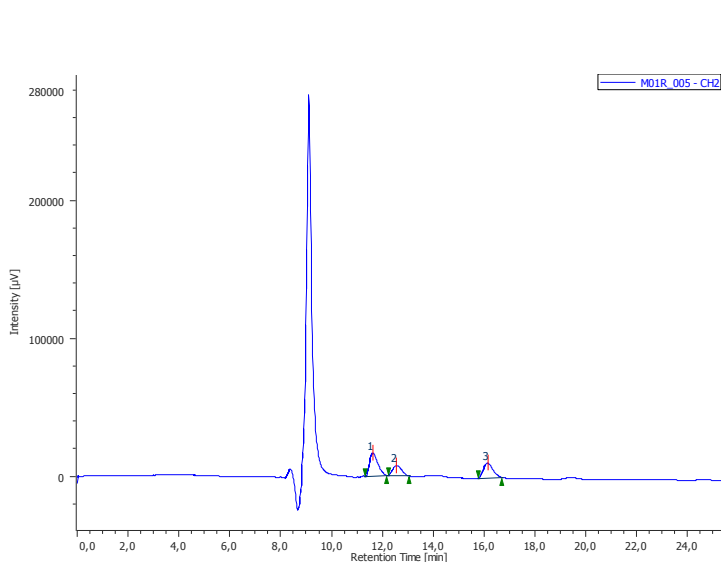
Sustrato	Temperatura	Concentración ácido v/v	Tiempo	Grados Brix	
				Rep. 1	Rep. 2
Raquis	60°C	3%	15 min	5 °B	5 °B
Raquis	60°C	3%	30 min	5 °B	5°B
Raquis	60°C	3%	60 min	5°B	5°B
Raquis	60 °C	3%	15 min	3,5 °B	3,5°B
Raquis	60 °C	3%	30 min	3,5 °B	3,5°B
Hojas	60 °C	3%	15 min	5°B	5°B
Hojas	60 °C	3%	30 min	5°B	5°B
Hojas	60 °C	3%	60 min	5°B	5°B
Pseudotallo	60 °C	3%	15 min	5°B	5°B
Pseudotallo	60 °C	3%	30 min	5°B	5°B
Pseudotallo	60 °C	3%	60 min	5°B	5°B
Nervaduras	60 °C	3%	15 min	5°B	5°B
Nervaduras	60 °C	3%	30 min	5°B	5°B
Nervaduras	60 °C	3%	60 min	5°B	5°B
Centro Pseudotallo	60 °C	3%	15 min	5°B	5°B
Centro Pseudotallo	60 °C	3%	30 min	5°B	5°B
Centro Pseudotallo	60 °C	3%	60 min	5°B	5°B

*Anexo 3: Resultados de hidrólisis a 60 °C y diferentes tiempos de reacción*

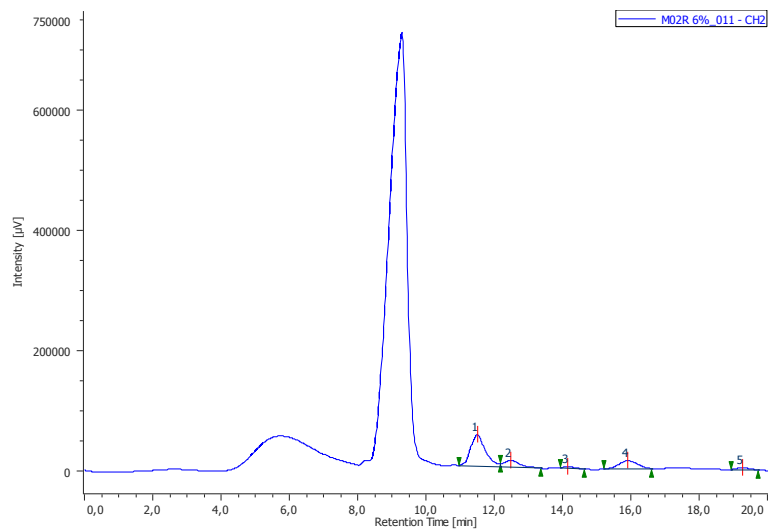
**Fuente: Autor**

## ANEXO 4

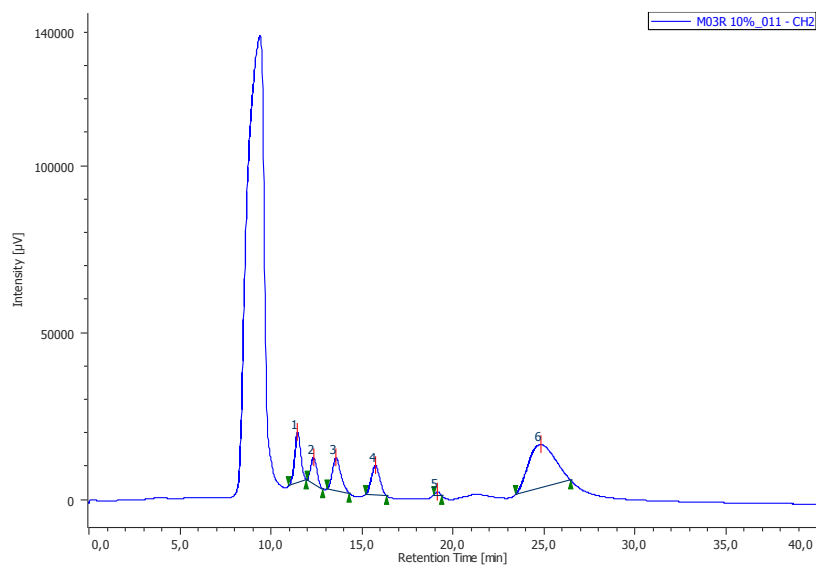
## CROMATOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE HPLC PARA EL RAQUIS



b) Raquis 3%, 15 min, 93°C



a) Raquis 6%, 15 min, 93°C

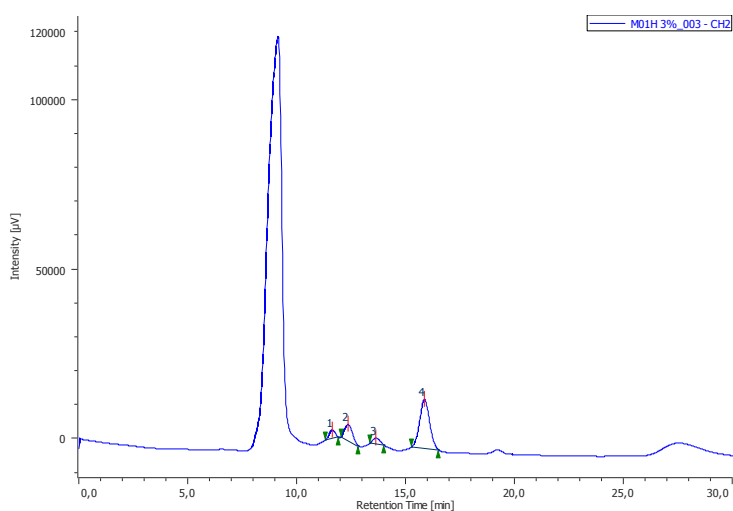


c) Raquis 10%, 15 min, 93°C

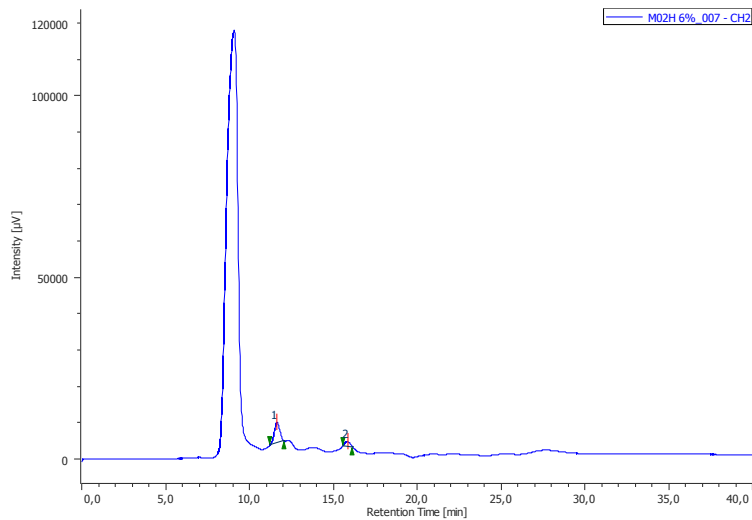
*Anexo 4: Cromatograma obtenido mediante HPLC para el raquis*

## ANEXO 5

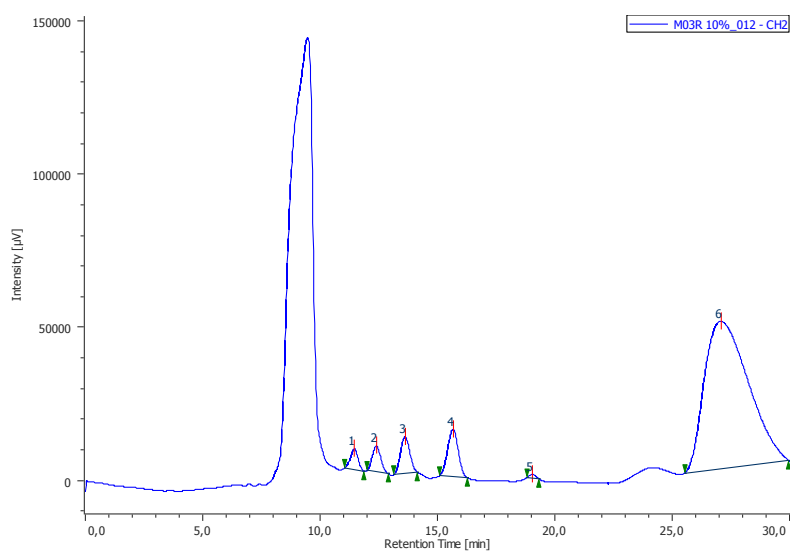
## CROMATOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE HPLC PARA LAS HOJAS



a) Hojas 3 %, 15 min, 93°C



b) Hojas 6 %, 15 min, 93°C

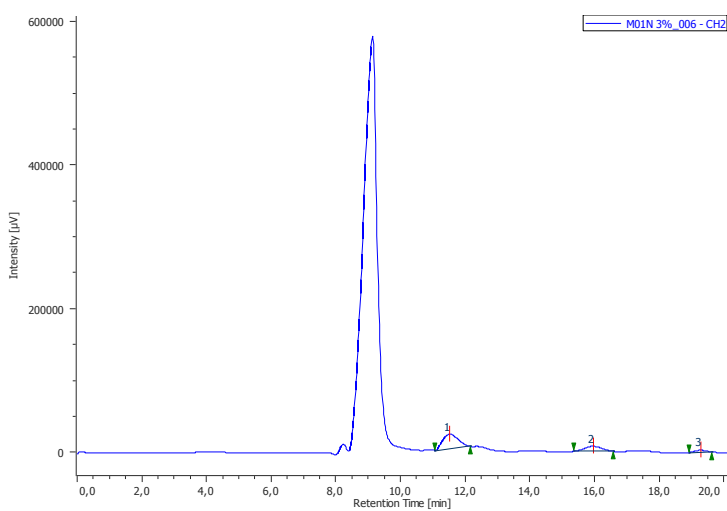


c) Hojas 10 %, 15 min, 93°C

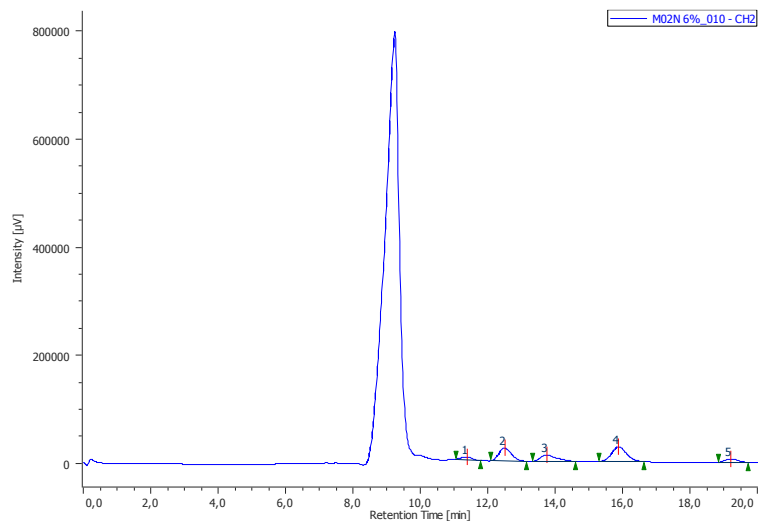
*Anexo 5: Cromatogramas obtenidos mediante HPLC para las hojas*

## ANEXO 6

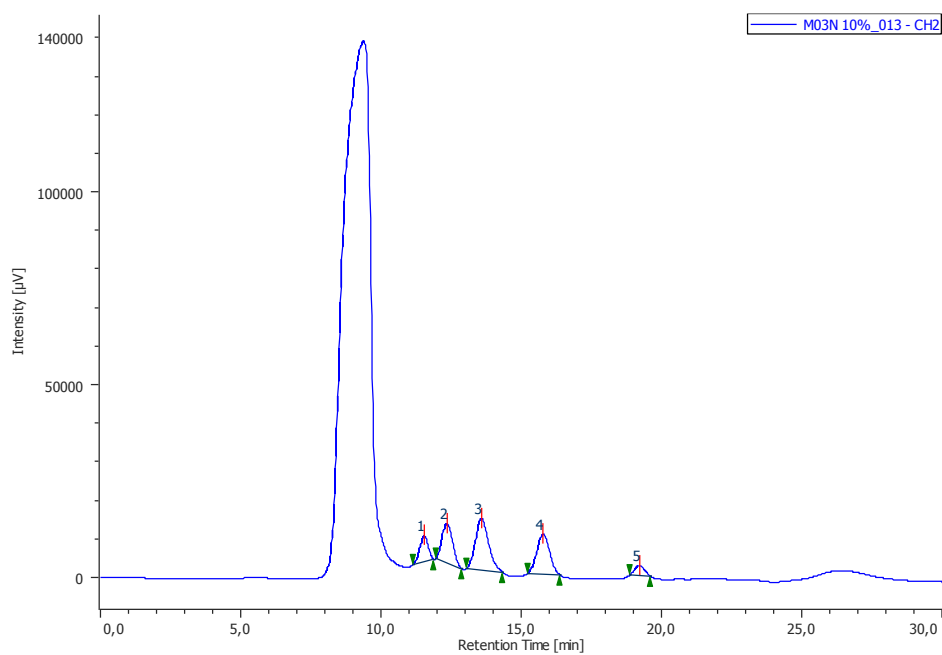
## CROMATOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE HPLC PARA LAS NERVADURAS



b) Nervaduras 3 %, 15 min, 93°C



a) Nervaduras 6 %, 15 min, 93°C

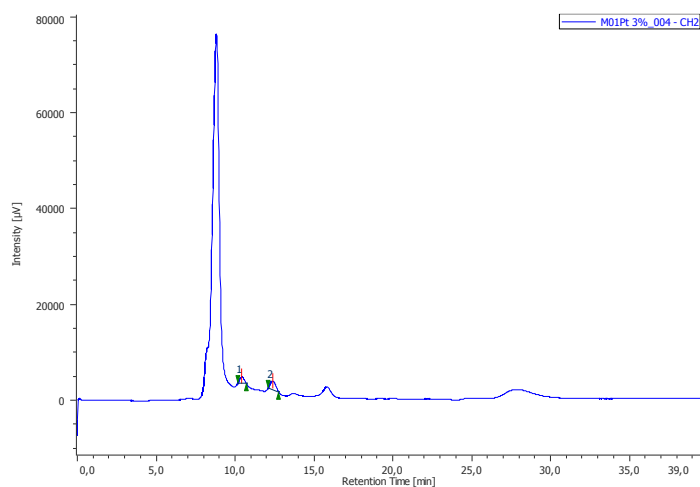


c) Nervaduras 10 %, 15 min, 93°C

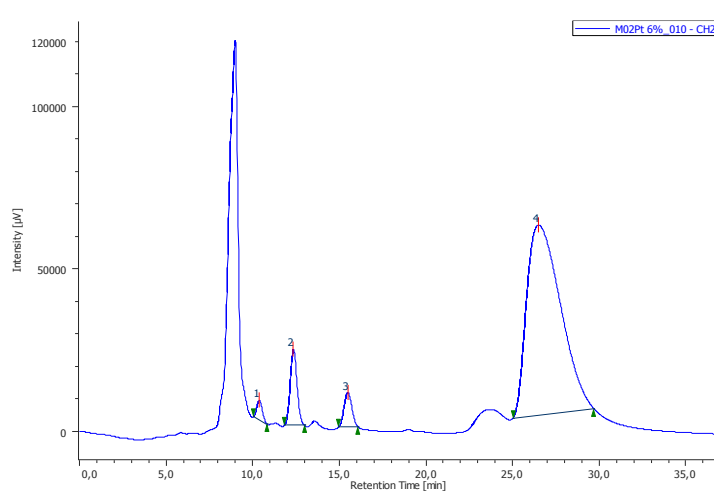
Anexo 6: Cromatogramas obtenidos mediante HPLC para las nervaduras

## ANEXO 7

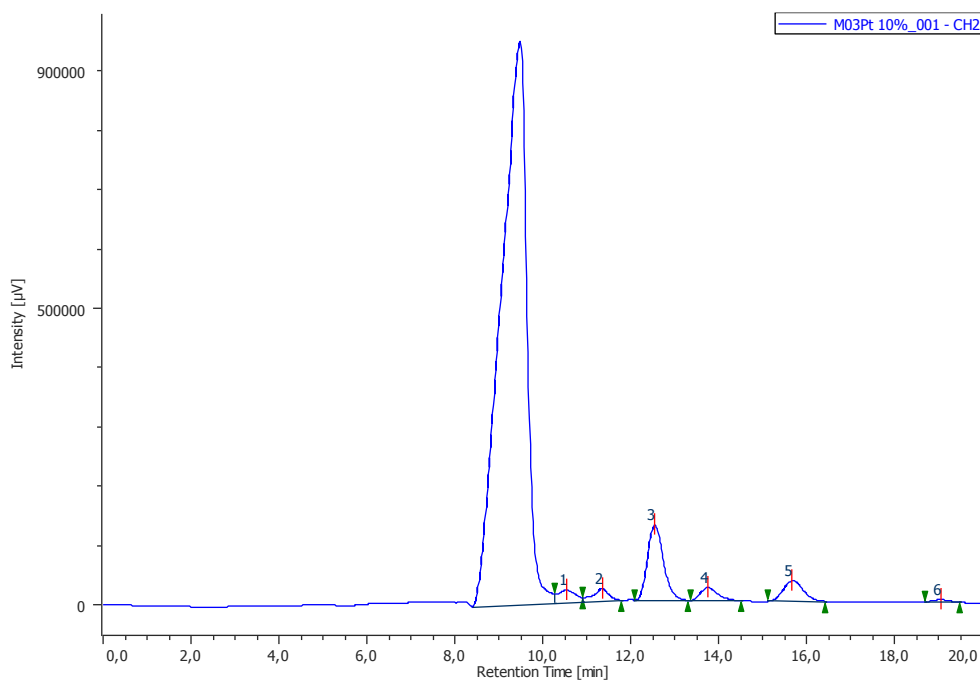
## CROMATOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE HPLC PARA EL PSEUDOTALLO



b) Pseudotallo 3 %, 15 min, 93°C



a) Pseudotallo 6 %, 15 min, 93°C

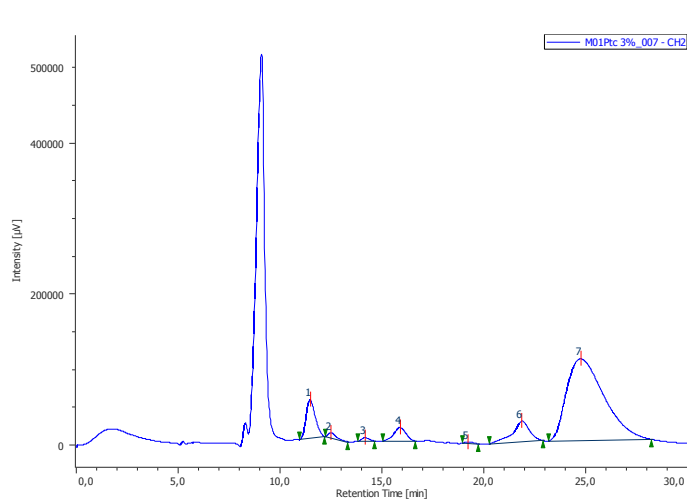


c) Pseudotallo 10 %, 15 min, 93°C

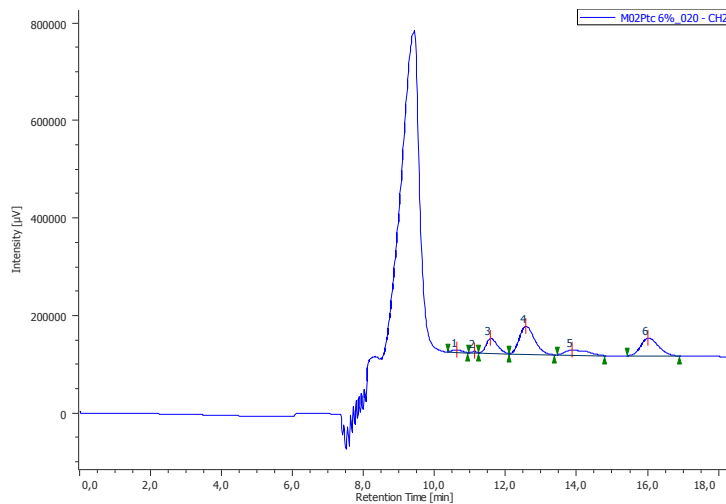
Anexo 7: Cromatogramas obtenidos mediante HPLC para el pseudotallo

## ANEXO 8

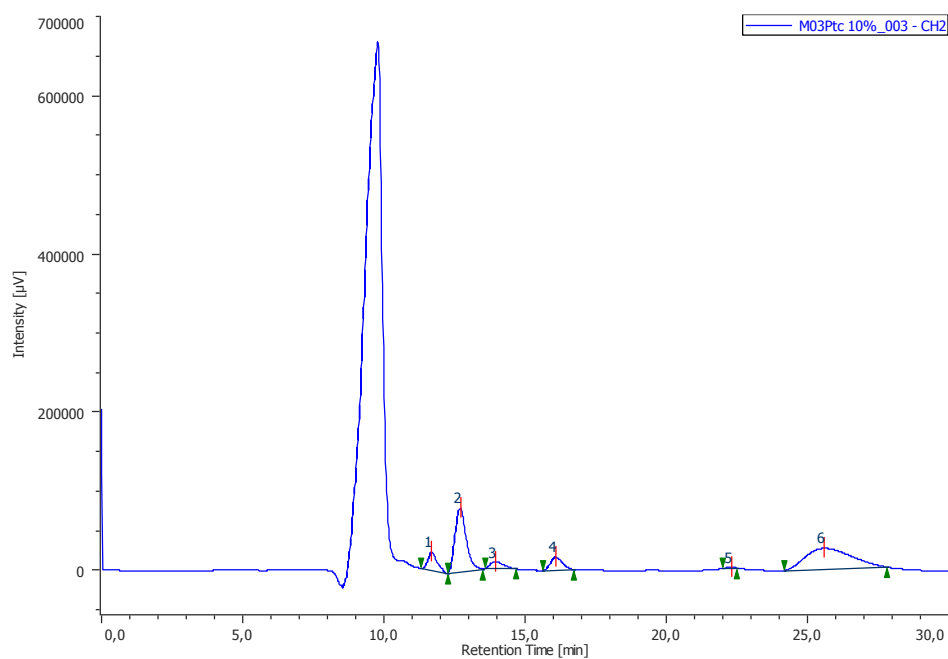
## CROMATOGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE HPLC PARA EL CENTRO DEL PSEUDOTALLO



a) C. Pseudotallo 3%, 15 min, 93°C



b) C. Pseudotallo 6%, 15 min, 93°C



c) C. Pseudotallo 10 %, 15 min, 93°C

Anexo 8: Cromatogramas obtenidos mediante HPLC para el centro del pseudotallo



## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Rivera, N., & Canizales Leal, M. (2004). Cinética de la hidrólisis ácida de la cascarilla de cebada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 257-263.
- Alvear, M., Castillo, C., Henao, W., Marimón, C., Tejada, L., & Tejada, A. (2009). Estudio de la Hidrólisis Ácida de cáscara de naranjas *Citrus Sinensis* para la obtención de etanol.
- Ana, F. C., & Flor, G. C. (2014). Programación por metas: Energía alternativa mediante biomasa. Sevilla.
- Banana Export. (2015). Exportaciones de banano.
- Barroso Casillas, M. (2010). Pretratamiento de masa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una Biorrefinería. Madrid.
- Carchi, D. (2014). Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de banano para obtener nanocelulosa. Cuenca, Ecuador.
- Chandler, C., Villalobos, N., González, E., Arenas, E., Mármol, Z., Rios, J., & Aiello, M. (2012). Hidrólisis Ácida Diluida de bagazo de caña de azúcar para la producción de azúcares fermentables. *Multiciencias*, 245-253.
- Chiaramonti, D. P. (2012). Revisión de los procesos de pre-tratamiento para la producción de etanol lignocelulósico, y el desarrollo de un método innovador. *Biomass and Bioenergy*, 1-11.
- Claudia Martínez-Anaya, \*. E.-L.-G. (2008). Celulasas fúngicas: Aspectos biológicos y aplicaciones. *Revista Latinoamericana de microbiología*, 119-131.
- Debabandya, M., Sabyasachi, M., & Namrata, S. (2010). Banana and its by-product utilisation: an overview. *Journal of Scientific*, 323-329.
- Fengel, D., & Gerd, W. (1984). *Wood:Chemestry, Ultrastructure, Reactions*. California: Illustrated.
- Foitzich Molina, A. C. (2013). Desarrollo y validación de una metodología para determinar azúcares simples en matrices orgánicas mediante HPLC- IR.
- Galbe, M., & Zacchi, G. (2002). A review of the production of ethanol from softwood. 618-628.





- Guarnizo, A., Martínez, P., & Valencia, A. (2009). Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia Et Technica*, 284-289.
- Hoyos, L., & Perez, Y. (2005). Pretratamiento del material Lignocelulósico de la planta de banano y su fruto para la producción de jarabe.
- INIAP. (2014). Condiciones agroecológicas para el cultivo de banano.
- Instituto Nacional de Preinversión. (2014). Atlas Bionergético del Ecuador.
- Jeffries, T. (1994). Biodegradation of lignin and hemicelluloses. *Biochemistry of microbial degradation*, 320-326.
- Keller, F. (1996). Integrated bioprocess development for bioethanol production. Wyman, , 351-357.
- López, F., García, J., Feria, M., Zamudio, M., & Pérez, A. (2010). Biorrefinería de materiales lignocelulósicos.
- Lora, J., & Glasser, W. (2002). Recent industrial applications of lignin: A sustainable alternative to nonrenewable materials. *Journal of Polymers and Environment*, 39-48.
- Lu, F., & John, R. (2010). Lignin. In S. Run-Cang, *Cereal Straw as a Resource for Sustainable Biochemicals and Biofuels*. 169-2017.
- Mejía Giraldo, L., Martínez Correa, H., Betancourt, J., & Castrillón Castaño, C. (2007). Aprovechamiento del residuo Agroindustrial del mango común en la obtención de azúcares fermentables. *Ingeniería y Ciencia*, 41-62.
- Monsalve, J., Medina, V., & Ruiz, A. (2006). Producción de etanol apartir de la cáscara de banano y de almidón de yuca.
- Musarama. (31 de Octubre de 2015). The image bank on all things banana. Obtenido de <http://www.musarama.org>
- NORMA INEN 0173. (1975). Cacao en grano, determinación de la humedad.
- Oliva Dominguez, J. M. (2003). Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo.
- Oliva Dominguez, J. M. (2003). Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo. Madrid.



- Oliveira, L. C. (2007). Chemical composition of different morphological parts from 'Dwarf Cavendish' banana plant and their potential as a non-wood renewable source of natural products.
- Pereira, U. T. (2009). Pretratamiento de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia*, 284-189.
- Pettersen, R. (1984). The chemical composition of wood. Washington: Roger M.
- PRO-ECUADOR. (2001). Clasificación de las especies de banano.
- ProMusa. (31 de Octubre de 2015). Mobilizing banana science for sustainable livelihoods. Obtenido de <http://www.promusa.org>
- Rogalinski, T., Ingram, T., & Brunner, G. (2008). Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures. *Journal of Supercritical Fluids*, 54-63.
- Romero Pulido, I. (2003). Hidrólisis ácida y enzimática del residuo de poda de olivo, fermentación de hidrolizados con *Pachysolen Tannophilus*. Universidad de Jaén.
- Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo. (12 de 06 de 2015). Obtenido de <http://www.planificacion.gob.ec/la-clementina-ordenamiento-territorial-para-la-revolucionagraria/>
- Soffner, M. (2001). Pulp production from banana stem. Brazil.
- Valenzuela Martínez, M. L. (2012). Hidrólisis Enzimática del excedente orgánico del banano usando el hongo *trametes versicolor* para la obtención de etanol. Quito.
- Velasquez, & Arredondo. (2010). Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues. *Energy*, 3081-3087.
- Wilder, B., & Albersheim, P. (1973). The structure of plant cell walls: A structural comparison of the wall hemicellulose of cell suspension cultures of sycamore. 889-893.